Министерство образования и науки Российской Федерации
Балтийский государственный технический университет «Военмех»

СПРАВОЧНИК ПО ТЕХНОЛОГИИ ПАТРОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

В двух томах

Под общей редакцией Н.П. Агеева,
В.И. Зиновкина, Н.М. Масляева

Том 1

Санкт-Петербург
2011

А в т о р ы: *Н.П. Агеев*, канд. техн. наук, проф;
Г.А. Данилин, д-р техн. наук, проф; Н.М. Масляев, канд. военных наук, проф., ген. дир. КБАЛ им. Л.Н. Кошкина; *В.И. Зиновкин*, зам. ген. конструктора по технологии КБАЛ им. Л.Н. Кошкина

УДК 623.455.01(035)
С74

С74 **Справочник** по технологии патронного производства: в 2 т. Т.1 / Под ред. Н.П. Агеева; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2011. – 643 с.
ISBN 978-5-85546-582-2

В первом томе приводится классификации патронов стрелкового оружия по эксплуатационным и конструктивно-технологическим признакам, основные положения по технологическому обеспечению и контролю качества патронов, применяемым материалам и комплектующим узлам, типовым процессам, применяемым методам и способам обработки, проектированию и расчету технологических процессов листовой штамповки.

Предназначен для инженерно-технических работников патронных заводов, КБ и НИИ, а также может быть полезен студентам вузов, специализирующимся в области проектирования и производства боеприпасов, при курсовом и дипломном проектировании.

УДК 623.455.2/6.01(035)

Р е ц е н з е н т ы: заслуженный деятель науки и техники РФ, д-р техн. наук, проф. *Н.А. Усенко*, управляющий директор Барнаульского патронного завода *Н.В. Степанов*

ISBN 978-5-85546-582-2

© БГТУ, 2011
© Авторы, 2011

О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ 8
Основные термины и определения 11
Основные условные обозначения и сокращения 14
Ч А С Т Ь I. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПАТРОНОВ. МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ 17
1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПАТРОНОВ (*Н.П. Агеев, Г.А. Данилин, Н.М. Масляев*) 17
1.1. Назначение и классификация патронов 17
1.2. Устройство и действие патронов различного назначения 24
1.2.1. Пистолетные патроны 27
1.2.2. Автоматные патроны 31
1.2.3. Винтовочные патроны 33
1.2.4. Крупнокалиберные патроны 35
1.2.5. Патроны со стреловидными пулями 38
1.2.6. Многопульные патроны 39
1.2.7. Бесшумные патроны 39
1.2.8. Патроны для подводной стрельбы 41
1.2.9. Вспомогательные патроны 42
1.3. Технические условия на изготовление (модернизацию) патрона 47
1.4. Технические требования к патронам 49
1.5. Качество патронов стрелкового оружия. Основные положения 50
1.6. Виды и методы испытания патронов стрелкового оружия 52
1.6.1. Испытания опытных образцов патронов 56
1.6.2. Сертификационные испытания патронов к гражданскому и служебному оружию 58
1.6.3. Средства испытаний 61
1.7. Технологичность конструкции патронов и их элементов 61
1.7.1. Технологическое обеспечение качества патронов 61
1.7.2. Методические основы обеспечения технологичности конструкции патронов 73
1.8. Классификация металлических элементов патронов по конструктивно-технологическим признакам 93
1.9. Обобщенный алгоритм технологического обеспечения качества и надежности патронов 106
Библиографический список 112
2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ПАТРОННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ (*Н.П. Агеев*) 113
2.1. Требования, предъявляемые к материалам 113
2.2. Виды материалов и сортамент 114
2.3. Цветные металлы и сплавы 115
2.3.1. Латуни 115
2.3.2. Свинец 125
2.4. Черные металлы 127
2.4.1. Стали 127
2.4.2. Металлокерамические твердые сплавы 142
2.5. Биметаллы 143
2.6. Контроль качества исходного материала и штампованных полуфабрикатов 148
2.6.1. Методы контроля 148
2.6.2. Контроль качества металла по химическому составу, макро- и микроструктуре 152
2.6.3. Контроль качества исходного материала и полуфабрикатов на наличие дефектов и размерам 155
2.6.4. Механические испытания 159
2.6.5. Технологические и натурные испытания материалов 168
Библиографический список 177

3. ПИРОТЕХНИЧЕСКИЕ СОСТАВЫ, ПОРОХА, КАПСЮЛИ-ВОСПЛАМЕНИТЕЛИ
(Г. А. Данилин)……...178
3.1. Пиротехнические составы для трассирующих пуль……178
3.2. Пиротехнические составы для зажигательных пуль……181
3.3. Пороха для патронов стрелкового оружия……184
3.4. Капсюли-воспламенители……...190
4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАТРОНОВ (Н. П. Агеев,
В. И. Зиновкин, Н. М. Масляев)……196
4.1. Структура технологических процессов изготовления патронов……196
4.2. Технологические процессы изготовления металлических элементов патронов……199
4.2.1. Классификация технологических процессов……199
4.2.2. Технологические процессы изготовления гильз и пиростаканов……206
4.2.3. Технологические процессы изготовления пульных оболочек……211
4.2.4. Технологические процессы изготовления сердечников……215
4.2.5. Технологические процессы изготовления рубашек……218
4.3. Технологические процессы приготовления пиротехнических составов……218
4.4. Технологические процессы сборки (монтажа пуль и снаряжения патронов)……221
Библиографический список……225
5. КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАТРОНОВ (Н. П. Агеев)……226
5.1. Классификация процессов штамповки……226
5.2. Характеристика и область применения процессов листовой разделительной штамповки……229
5.3. Характеристика и область применения процессов листовой формоизменяющей штамповки……234
5.4. Характеристика и область применения процессов объемной штамповки……237
5.4.1. Процессы разделительной штамповки……237
5.4.2. Процессы формоизменяющей штамповки……238
5.5. Характеристика и область применения процессов комбинированной штамповки……240
5.5.1. Комбинированная листовая штамповка……241
5.5.2. Комбинированная объемная штамповка……243
5.5.3. Комбинированная объемно-листовая штамповка……244
5.6. Способы штамповки……245
Библиографический список……248
ЧАСТЬ II. ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА……249
6. ПРОЦЕССЫ ВЫРУБКИ И ПРОБИВКИ (Н. П. Агеев)……249
6.1. Технологические особенности процессов……249
6.2. Технологические возможности и ограничения процессов……253
6.3. Технологичность конструкции штампуемых заготовок и деталей……259
6.3.1. Конструктивно-технологические параметры заготовок и деталей штампуемых способами вырубки и пробивки……259
6.3.2. Оценка технологичности конструкции штампуемых деталей……260
6.4. Расчет технологических параметров процессов вырубки и пробивки……261
6.5. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента……268
6.6. Расчет технологических усилий……271
6.7. Расчет рабочего инструмента на прочность……272
6.8. Пример технологических расчетов процесса вырубки заготовок стальной гильзы клб. 14,5 мм……277
6.8.1. Исходные данные……277
6.8.2. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента……278
6.8.3. Расчет технологических усилий……279

6.8.4. Расчет рабочего инструмента на прочность……..280
6.8.5. Расчет коэффициента использования металла (КИМ)……..282
Библиографический список……..…283
7. ВЫТЯЖКА (БЕЗ УТОНЕНИЯ СТЕНКИ ЗАГОТОВКИ) (Н. П. Агеев)……..284
7.1. Способы вытяжки……..285
7.2. Технологические особенности процесса вытяжки цилиндрических деталей……285
7.2.1. Вытяжка без прижима из плоской осесимметричной заготовки (кружка)……285
7.2.2. Вытяжка без прижима из плоской неосесимметричной заготовки……..…291
7.2.3. Вытяжка с прижимом из плоской заготовки……..…292
7.2.4. Последующая вытяжка……..295
7.3. Вытяжка деталей коробчатой формы……..298
7.4. Технологические возможности и ограничения процессов вытяжки……..…..302
7.5. Технологические требования, предъявляемые процессом вытяжки к конструкции штампуемых деталей……311
7.6. Контроль и обеспечение качества штампуемых деталей……..313
7.7. Технологические расчеты……314
7.7.1. Исходные данные и последовательность расчетов……...…..314
7.7.2. Расчет размеров заготовок……314
7.7.3. Расчет количества вытяжных операций……319
7.7.4. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента……320
7.7.5. Расчет технологических усилий……323
Библиографический список……323
8. ВЫТЯЖКА С УТОНЕНИЕМ (Н. П. Агеев, Г. А. Данилин)…….……324
8.1. Способы вытяжки…….…324
8.2. Свёртка……...……325
8.3. Вытяжка с утонением через одну матрицу……...……..327
8.4. Вытяжка с утонением через две матрицы……...……338
8.5. Технологические возможности и условия ограничения деформации при вытяжке……..…344
8.6. Технологические требования, предъявляемые к конструкции штампуемых деталей……...365
8.7. Качество деталей, изготавливаемых вытяжкой……..369
8.8. Технологические расчеты при вытяжке……..……382
8.8.1. Исходные данные и последовательность расчетов……..…382
8.8.2. Расчет размеров и механических свойств конечной заготовки……...…..383
8.8.3. Расчет размеров исходной заготовки……...392
8.8.4. Расчет количества вытяжных операций……406
8.8.5. Расчет размеров заготовок после упрочняющих операций……...…..414
8.8.6. Расчет размеров заготовок на промежуточных операциях……..421
8.8.7. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента……...…425
8.8.8. Конструкция вытяжного инструмента……...……431
8.8.9. Расчет технологических усилий……...……..439
8.9. Пример расчета технологических параметров процесса вытяжки с утонением……..…442
8.9.1. Исходные данные……..…442
8.9.2. Определение размеров и механических свойств конечной заготовки……....443
8.9.3. Расчет размеров исходной сплошной заготовки (кружка) для вытяжки с утонением……...442
8.9.4. Расчет размеров исходной полой заготовки (после свёртки)……..……445
8.9.5. Расчет количества вытяжных операций……448
8.9.6. Расчет размеров заготовок после промежуточных вытяжек……..…457
8.9.7. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента на вытяжных операциях……458
8.9.8. Расчет технологических усилий при вытяжке с утонением……..……464

Библиографический список……..…….465
9. КОМБИНИРОВАННАЯ ВЫТЯЖКА (Г. А Данилин)……..466
9.1. Область применения процесса комбинированной вытяжки……...…..466
9.2. Способы проведения комбинированной вытяжки……467
9.3. Определение размеров конечной заготовки (расчетной детали) и оценка возможности её изготовления комбинированной вытяжкой…….……472
9.4. Определение формы и размеров заготовки перед вытяжкой……475
9.5. Расчет количества операций……....476
9.6. Определение формы и размеров заготовок после промежуточных вытяжек……..……478
9.7. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента……479
*9.7.1. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента на свёртке..……..….*479
9.7.2. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента на последующих операциях комбинированной вытяжки……..…..483
9.8. Расчет технологических усилий на комбинированной вытяжке……..487
9.9. Пример расчета технологических параметров комбинированной вытяжки……...……489
9.9.1. Определение размеров расчетной детали и оценка возможности её изготовления комбинированной вытяжкой……....489
*9.9.2. Определение количества операций и назначение степеней деформации…..……..*490
9.9.3. Определение формы и размеров заготовок после операции вытяжки……..492
9.9.4. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента……493
9.9.5. Расчет технологических усилий……....496
Библиографический список……497
10. ОБЖИМ (Н. П. Агеев)……498
10.1. Способы обжима……..498
10.2. Технологические особенности процесса продольного обжима гильз……..……..502
10.3. Технологические особенности процесса продольного обжима тонкостенных заготовок в матрицах с криволинейной образующей……..…..519
10.3.1. Обжим открытого торца полой цилиндрической заготовки……..….519
10.3.2. Обжим дна (закрытого торца) цилиндрической заготовки……523
10.4. Устойчивость заготовок при обжиме……..……..526
10.5. Технологические возможности процесса обжима по обеспечению качества штампуемых деталей……546
10.6. Контроль качества деталей при обжиме……...…553
10.7. Технологические расчеты……..…..556
10.7.1. Исходные данные и последовательность расчетов……..…….556
10.7.2. Расчет размеров и механических свойств конечной штампованной заготовки……...….556
10.7.3. Оценка и обеспечение технологичности конструкции конечной штампованной заготовки……....565
10.7.4. Расчет размеров исходной заготовки…….……568
10.7.5. Расчет количества операций……570
10.7.6. Расчет размеров заготовки после промежуточных операций……579
10.7.7. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента……..…583
10.7.8. Расчет технологических усилий……...586
10.8. Пример расчета технологических параметров процесса обжима……...……593
10.8.1. Исходные данные……...….593
10.8.2. Оценка технологичности конструкции конечной заготовки при обжиме……..…...595
10.8.3. Расчет размеров исходной заготовки……...……..598
10.8.4. Расчет количества операций обжима……601
10.8.5. Расчет размеров заготовки после первого обжима……...…605
10.8.6. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента (матриц обжима)……..….608

10.8.7. Расчет технологических усилий……..……..610
Библиографический список……..……..614
11. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ОЖИВАЛЬНОЙ ЧАСТИ ПУЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК (Г.А. Данилин)……...…615
11.1. Способы формообразования……...……615
11.2. Технологические особенности и возможности процесса бесступенчатого формообразования……..…..618
11.3. Технологические особенности процесса ступенчатого формообразования……..623
11.4. Обеспечение качества штампуемых деталей……..…..625
11.5. Технологические расчеты……..…626
11.5.1. Исходные данные и последовательность расчетов…….……..626
11.5.2. Расчет размеров конечной штампованной заготовки…….……627
11.5.3. Оценка технологичности конструкции конечной штампованной заготовки……..…..628
11.5.4. Расчет размеров исходной заготовки……...……..630
11.5.5. Расчет количества операций……631
11.5.6. Расчет размеров заготовок на промежуточных операциях……..…..636
11.5.7. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента……..638
11.5.8. Расчет технологических усилий…….…..643
Библиографический список……...….643

Посвящается
75-летию каф. Е4
БГТУ «Военмех»
и 65-летию КБАЛ
им. акад. Л.Н. Кошкина

ВВЕДЕНИЕ

Надежность и эффективность функционирования стрелкового оружия в значительной степени определяются надежностью патронов при эксплуатации с учетом их целевого назначения. Поэтому совершенствованию технологического обеспечения надежности и производства патронов уделяется большое внимание.

К основным особенностям патронного производства относятся:

1) массовость и серийность;

2) комплексный характер технологии изготовления патронов и их элементов;

3) высокий технический уровень, включая уровень механизации и автоматизации производства;

4) высокая степень технического контроля;

5) применение метода обработки металла давлением, в частности холодной штамповки, в качестве основного метода формообразования металлических элементов и сборки патронов;

6) сложность и повышенная опасность процессов приготовления пиротехнических составов и сборки патронов;

7) специализация.

Комплексный характер технологии определяется применением сложных многооперационных процессов на основе различных по физической природе методов обработки материалов (механической обработки давлением и резанием, термической, химической, электрохимической и др.). Это связано с необходимостью обеспечения заданных техническими условиями разнородных свойств изготавливаемого изделия (геометрические, металлографические, механические, физические). Высокий уровень производства и контроля определяют высокую надежность функционировании патронов, их длительную сохранность в боевых условиях и при хранении на складах.

Широкое применение метода холодной штамповки в патронном производстве обусловлено следующими его преимуществами:

- возможностью изготовления металлических элементов сложной конструкции, жестких и прочных, при их минимальной металлоемкости;

- полной взаимозаменяемостью штампованных деталей;
- высокими экономически целесообразными точностью и качеством штампуемых деталей и изделия в целом;
- потенциально высоким коэффициентом использования металла при его минимальном отходе;
- высокой производительностью;
- возможностью механизации и автоматизации технологического процесса;
- низкой трудоемкостью и себестоимостью изготовления штампуемых изделий.

Особенностью патронного производства является его узкая специализация. Она определяется специфическими требованиями к этому виду продукции, вытекающими из условий функционирования патронов (необходимость обеспечения жесткости, прочности, обтюрации, экстрактирования, определенных баллистических свойств, кучности, специального действия и др.), а следовательно, необходимостью применения специальной комплексной технологии изготовления, специального технологического оборудования. Реализация такой технологии возможна только при наличии специальных инженерно-технических кадров, имеющих высокую профессиональную подготовку в этой области. Производство патронов требуемого уровня качества и в необходимом количестве может быть реализовано только на специализированных патронных заводах.

К основным направлениям развития патронного производства относятся следующие:

1. Повышение технологичности конструкции патронов и их элементов, находящихся в производстве и вновь разрабатываемых. При этом важной конкретной задачей является разработка научных основ, единой методики и руководящих материалов по отработке и сравнительной оценке изделий на технологичность.

2. Разработка научно обоснованных методик проектирования технологических процессов.

3. Совершенствование существующих технологических процессов за счет внедрения высококачественных материалов и малоотходных заготовок (плоских листовых, прутковых, трубных, калиброванных повышенной точности) и прогрессивных способов обработки (холодного выдавливания, точной объемной штамповки, комбинированных процессов и др.).

4. Повышение надежности патронов за счет обеспечения точности, стабильности и устойчивости технологических процессов; внедрение систем технического контроля, гарантирующих выпуск продукции высокого качества, оснащения производства автоматизированными средствами контроля изделий.

5. Повышение стойкости штампового и режущего инструмента за счет изыскания оптимальных условий обработки, обеспечивающих наименьшие удельные нагрузки на инструмент; применение высокопрочных и износостойких материалов для изготовления рабочего инструмента и способов его упрочняющей обработки.

6. Разработка технологических основ ремонта и утилизации патронов.

7. Комплексная механизация и автоматизация производства.

Настоящий справочник издается в двух томах.

В первом томе описываются назначение, классификация, устройство и действие основных видов патронов, технические условия и требования, определяющие их качество, методы испытания и оценки технологичности конструкции металлических элементов патронов; применяемые конструкционные металлические материалы, капсюли-воспламенители; типовые технологические процессы; классификация процессов холодной штамповки, применяемых в патронном производстве, технологические особенности и методы проектирования процессов листовой штамповки.

Во втором томе рассматриваются процессы, объемной и комбинированной штамповки, применяемые для изготовления металлических элементов; термической и химической обработки и сборки пуль и патронов.

При подготовке справочника использованы материалы патронных заводов, КБАЛ, НИИ, а также результаты исследований, выполненных в БГТУ «Военмех» им. маршала Д.Ф. Устинова, а также в ОАО «Конструкторское бюро автоматических линий» (КБАЛ) им. акад. Л.Н. Кошкина.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Изделие – любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии. Изделия в зависимости от назначения делят на изделия основного и вспомогательного производства.

К изделиям основного производства относят изделия, предназначенные для поставки (реализации), к изделиям вспомогательного производства – изделия, предназначенные только для собственных нужд предприятия, изготавливающего их.

Деталь – изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала, без применения сборочных операций.

Сборочная единица – изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе сборочными операциями.

Комплекс – два и более специфицированных изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций.

Комплект – два и более изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но представляющих набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера.

Комплектующее изделие – изделие предприятия-поставщика, применяемые как составная часть изделия, выпускаемая другим предприятием.

Типовое изделие – изделие, принадлежащее к группе близких по конструкции изделий и обладающее наибольшим количеством конструктивных и технологических признаков этой группы.

Полуфабрикат – изделие предприятия-поставщика, подлежащее дополнительной обработке или сборке.

Заготовка – предмет производства из которого изменением формы, размеров, шероховатости поверхностей и свойств материала изготавливают деталь или неразъемную сборочную единицу.

Исходная заготовка – заготовка перед первой технологической операцией.

Конечная заготовка – заготовка после последней формоизменяющей операции определенного вида.

Основной материал – материал исходной заготовки.

Вспомогательный материал – материал, расходуемый при выполнении технологического процесса дополнительно к основному материалу.

Сборочный комплект – группа составных частей изделия, которые необходимо подать на рабочее место для сборки изделия или его составной части.

Качество объекта технологии – совокупность его свойств, обуславливающая его пригодность к выполнению своих функций в соответствии с назначением и предъявляемыми к нему требованиями.

Технологическое обеспечение качества объекта технологии – обеспечение технологичности его конструкции и определенного уровня качества технологического процесса изготовления изделия.

Технологичность конструкции изделия – совокупность свойств этой конструкции, определяющая пригодность изделия, к изготовлению, эксплуа-

тации и ремонту с оптимальными затратами всех видов ресурсов при обязательном обеспечении всех заданных эксплуатационных свойств для принятых условий изготовления, эксплуатации и ремонта.

Различают технологичность производственную, эксплуатационную, при техническом обслуживании, ремонтную, заготовки, детали, сборочной единицы, изделия и др.

Производственный процесс – совокупность действий исполнителей и средств производства, необходимых на данном предприятии для изготовления изделий.

Технологический процесс – часть производственного процесса, содержащая действия по изменению и последующему определению состояния предмета производства.

Различают технологические процессы: проектные, рабочие, единичные, типовые, групповые, стандартизованные, временные, перспективные, маршрутные, операционные, маршрутно-операционные.

Технологическая операция – законченная часть технологического процесса, выполняемая на данном рабочем месте.

Рабочее место – часть производственной площади цеха, на которой размещены один или несколько исполнителей работы и обслуживаемая ими единица технологического оборудования или часть конвейера, а так же оснастка и (на ограниченное время) предметы производства.

Технологический переход – законченная часть технологической операции, характеризуемая постоянством применяемого инструмента и поверхностей, образуемых обработкой или соединяемых при сборке.

Вспомогательный переход – законченная часть технологической операции, состоящей из действия человека и (или) оборудования, которые не сопровождаются изменением формы, размеров и шероховатости поверхностей, но необходимы для выполнения технологического перехода.

Позиция – фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой или собираемой сборочной единицей совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижной части оборудования для выполнения определенной части операции.

Установка – часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемых заготовок или собираемой сборочной единицы.

Рабочий ход – законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменением формы, размеров, шероховатости поверхностей или свойств заготовки.

Вспомогательный ход – законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, не сопровождаемого изменением формы, размеров, шероховатости поверхностей или свойств заготовки, но необходимого для выполнения рабочего хода.

Технологическое оборудование – орудия производства, в которых для выполнения определенной части технологического процесса размещаются

материалы или заготовки, средства воздействия на них и при необходимости источники энергии.

Технологическая оснастка – орудия производства, добавляемые к технологическому оборудованию для выполнения определенной части технологического процесса.

Средства технологического оснащения – совокупность технологического оборудования, оснастки и средств механизации вспомогательных переходов.

Наладка – подготовка технологического оборудования и оснастки к выполнению определенной технологической операции.

Подналадка – дополнительная регулировка технологического оборудования и (или) оснастки в процессе работы для восстановления достигнутых при наладке значений параметров.

Качество технологического процесса изготовления изделия – совокупность свойств процесса, обусловливающая его пригодность к выполнению своих функций.

Функция технологического процесса – изготовление изделия с заданным комплексом свойств при нормированных затратах всех видов ресурсов.

Базирование – придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат.

Схема базирования – схема расположения опорных точек на базах заготовки или изделия.

База – поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащая заготовке или изделию и используемая для базирования.

По назначению базы делят на конструкторские, технологические, измерительные.

Конструкторская база – база, используемая для определения положения детали или сборочной единицы в изделии.

Технологическая база – база, используемая для определения положения заготовки или изделия в процессе изготовления или ремонта.

Измерительная база – база, используемая для определения положения заготовки или изделия и средств измерения.

Различают установочные, направляющие и опорные базы.

Технологическая подготовка производства – совокупность взаимосвязанных процессов, обеспечивающих технологическую готовность предприятия к выпуску изделия заданного уровня качества при установленных сроках, объеме выпуска и затратах.

Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП) – установленная государственными стандартами система организации и управления технологической подготовки производства, непрерывно совершенствуемая на основе достижений науки и техники и управляющая развитием технологической подготовки производства на уровнях государственном, отраслевом и предприятий (объединений).

Единая система технологической документации (ЕСТД) – установленная государственными стандартами система оформления технологических процессов на изготовление изделий.

Программа выпуска изделий – перечень наименований изготовляемых или ремонтируемых изделий с указанием объема выпуска и срока выполнения по каждому наименованию.

Объем выпуска изделий – количество изделий определенных наименований, типоразмера и исполнения, изготавливаемых или ремонтируемых предприятием в течении планируемого интервала времени.

Единичное производство – производство, характеризуемое широкой номенклатурой изготавливаемых или ремонтируемых изделий и малым объемом выпуска изделий.

Серийное производство – производство, характеризуемое ограниченной номенклатурой изделий, изготавливаемых или ремонтируемых периодически повторяющимися партиями и сравнительно большим объемом выпуска.

Массовое производство – производство, характеризуемое узкой номенклатурой и большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых или ремонтируемых в течении продолжительного времени.

Опытное производство – производство образцов, партий или серии изделий для проведения исследовательских работ или разработки конструкторской и технологической документации для установившегося производства.

Поточная организация производства – форма организации производства, характеризуемая расположением средств технологического оснащения в последовательности выполнения операций технологического процесса и специализации рабочих мест.

Групповая организация производства – форма организации производства, характеризуемая совместным изготовлением или ремонтом групп изделий различной конфигурации на специализированных рабочих местах.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

D_0, S_0 – диаметр и толщина исходной плоской листовой заготовки;

D_0, H_0 – диаметр и высота исходной цилиндрической заготовки, получаемой отрезкой из прутка;

a_4, a_6 – сторона, соответственно, квадратной и шестигранной исходной плоской листовой заготовки;

D_0, S_0, H_0 – наружный диаметр, толщина стенки и высота исходной трубной заготовки;

D, H, S – наружный диаметр, высота, толщина стенки готовой полой детали;

$S^{в}$,.S^{j},.$S^{н}$, $S^{д}$ – толщины стенок полой с дном детали в верхнем, промежуточном, нижнем расчетном (контрольном) сечениях и толщина дна соответственно;

$h^{в}$,..h^{j},..$h^{н}$ – расстояния верхнего, промежуточного и нижнего расчетных сечений от внутренней поверхности дна в полой заготовки;

d_i, $S_i^{в}$,..., S_i^{j},...$S_i^{н}$, $S_i^{д}$, $h_i^{в}$, h_i^{j}, $h_i^{н}$ – наружный диаметр, толщины стенок в верхнем, промежуточном и нижнем расчетном сечении соответственно, толщина дна и расстояния этих расчетных сечений от внутренней поверхности дна полой заготовки на промежуточной *i*-й операции;

d_n, $S_n^{в}$,..., S_n^{j},..., $S_n^{н}$, $S_n^{д}$, $h_n^{в}$,..., h_n^{j},..., $h_n^{н}$ – наружный диаметр, толщины стенок в расчетных сечениях (верхнем, промежуточном, нижнем) и их расстояния от внутренней поверхности дна полой заготовки на конечной штамповочной операции;

α, β , α_n, β_n, α_i, β_i – углы конусности готовой детали, конечной и промежуточной заготовок соответственно;

R_ρ, R_θ – радиусы кривизны заготовки в меридиональном и окружном направлениях;

$\Delta S = S_{\max} - S_{\min}$ – абсолютная разнотолщинность (разностенность) в поперечном сечении заготовки;

$S_{\max}$, $S_{\min}$ – максимальная и минимальная толщина стенки в одном поперечном сечении заготовки;

$\delta_s = \Delta S/S_{ср}$ – относительная разностенность заготовки в одном поперечном сечении;

$S_{ср} = (S_{\max} + S_{\min})/2$ – средняя в поперечном сечении толщина стенки;

$\rho^{ос}$, $\rho^{гр}$ – радиусы "опасного" и "граничного" сечений заготовки;

$d_м$, $d_п$ – диаметры матриц и пуансона соответственно;

р.с. – расчетное сечение;

z – односторонний технологический зазор между поверхностями рабочего инструмента;

$h_п$ – ход инструмента;

$П_д = T^{В} – T^{Н}$ – поле допуска на размер детали;

$T^{В}$, $T^{Н}$ – верхнее и нижнее допускаемое отклонения на размер детали;

$П_и$ – припуск на износ инструмента;

E – модуль упругости;

G – модуль сдвига;

μ – коэффициент Пуассона;

$\sigma_Т$, $\sigma_{0.2}$ – физический и условный пределы текучести;

$\sigma_В$ – временное сопротивление;

σ_{iy} – интенсивность напряжений в момент начала образования шейки при испытании образцов на растяжение;

σ_{ip} – интенсивность напряжений в момент разрушения при испытании образцов на растяжение;

ε_{iy}, ε_{ip} – интенсивность деформаций в момент образования "шейки" и разрушения при испытании образцов на растяжение;

δ, ψ – полное относительное удлинение и сужение при испытании образцов на растяжение;

ε_i, $\dot{\varepsilon}_i$ – интенсивности деформации и скорость деформации;

$\lambda = \sqrt{3}\,\varepsilon_i$ – интенсивность деформации сдвига;

e_i – степень деформации;

$e_{i\text{эф}}$, $e_{i\Sigma}$ – эффективная и накопленная степени деформации;

ε_1, ε_2, ε_3, ($\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$) – главные компоненты деформации;

ε_ρ, ε_θ, ε_n – компоненты деформации в меридиональном, тангенциальном направлениях и в направлении нормали к срединной поверхности заготовки;

ν_ε, ν_σ – характеристики вида деформированного и напряженного состояния соответственно;

σ_i – интенсивность напряжений;

$\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ – функциональная зависимость между σ_i и ε_i;

σ_1, σ_2, σ_3 – главные нормальные напряжения;

A – работа;

$A_{\text{уд}}$ – удельная работа формоизменения;

$K = -3p/\sigma_i = \sqrt{3}\,\sigma/T$ – показатель жесткости схемы напряженного состояния;

$p = -\sigma = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ – гидростатическое давление;

$T = \sigma_i/\sqrt{3}$ – интенсивность касательных напряжений;

$\sigma_{\text{кр}}$ – критическое напряжение;

$P_{\text{кр}}$ – критическая нагрузка;

ω_i – коэффициент использования запаса (ресурса) пластичности;

[σ], [e_i], [ω_i], [P] – допустимые значения напряжения, деформации, ресурса пластичности, усилия;

P – технологическое усилие;

$E_{\text{к}}$, $E_{\text{с}}$ – касательный и секущий модули;

f – коэффициент трения;

ρ_0 – плотность материала;

t, τ – температура и длительность нагрева;

НДС – напряженно-деформированное состояние;

ОМД – обработка металла давлением;

ХШ – холодная штамповка;

ОПД – очаг пластической деформации;

ТКИ – технологичность конструкции изделия;

ЕСТД – единая система технологической документации;

ЕСТПП – единая система технологической подготовки производства.

ТУ – технические условия;

ТЗ – техническое задание;

ОТК – отдел технического контроля;

ПЗ – представитель заказчика;

ОКР – опытно-конструкторские работы.

Ч А С Т Ь I. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПАТРОНОВ. МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПАТРОНОВ

1.1. Назначение и классификация патронов

Основным назначением боевого стрелкового комплекса является поражение живой силы и боевой техники противника. Оружие и патроны являются неотъемлемыми составляющими комплекса. В более широком смысле стрелковые комплексы могут решать не только боевые, но и другие задачи и в зависимости от этого подразделяются на боевые, гражданские и служебные.

Исходя из условий выполнения боевых задач стрелковые комплексы “оружие–патроны” можно подразделить на:

- основное оружие, применяемое в частях мотопехоты, воздушно-десантных войсках, в частях морской пехоты, пограничных подразделениях и специальных частях внутренних войск: автоматы и автоматические винтовки, ручные пулемёты, снайперские винтовки;
- огневые средства усиления – оружие, предназначенное для усиления огневой мощи боевой техники: курсовые и спаренные с пушкой пулемёты на танках и пулемётные установки на вертолётах и боевых машинах пехоты;
- вспомогательные, предназначенные, в основном, для самообороны и выполнения специальных задач: пистолеты, револьверы, пистолеты-пулемёты, укороченные варианты автоматов, различные виды специального оружия.

Гражданские стрелковые комплексы “оружие–патроны” предназначены для самообороны, занятий спортом и охотой. Эти комплексы включают оружие с нарезными, гладкими стволами и бесствольное. Основными требованиями к этим комплексам являются гарантия безопасности в обращении и эксплуатации, исключение режима автоматической стрельбы. Патроны не должны иметь бронебойного, зажигательного, разрывного и трассирующего действий, сердечники пуль должны изготавливаться не из твёрдого металла. Пороховой заряд патронов регламентирован, обеспечивает сравнительно небольшую дальность полёта пули (снаряда), гарантирует прочное функционирование гильз при выстреле и надёжную их экстракцию.

Служебные стрелковые комплексы “оружие–патроны” предназначены для оперативного использования должностными лицами государственных органов, которым законодательством Российской Федерации разрешено ношение и применение огнестрельного оружия. Обеспечение требований безопасности в обращении и применении оружия здесь также является основополагающим и включает, кроме указанных для гражданского стрелкового комплекса, ещё минимизацию рикошета пуль, исключающую поражение лиц, случайно оказавшихся в зоне стрельбы. Для служебных целей используют гладкоствольное и нарезное оружие с дульной энергией, не превышающей 300 Дж.

Военной доктриной Российской Федерации на силы и средства общего назначения возлагается до 30% решения боевых задач. Это определяет то важное место, которое занимают стрелковое оружие и боеприпасы к нему в формулируемой государственной программе вооружений.

Концепция применения боевого стрелкового оружия формируется на основе постановки и выполнения боевых задач. Для основного оружия, средств огневого усиления и вспомогательного разрабатываются методики их тактического и оперативного применения.

В тактико-технических заданиях (ТТЗ) на разработку систем “оружие–патроны” и тактико-технических требованиях (ТТТ) по их эксплуатации регламентируется дальность эффективного поражения противника, характеристика цели поражения и средства её защиты, боевой комплект боеприпасов, масса и габариты оружия и патронов, требования безотказности и безопасности в служебном обращении.

Критерием поражения цели боевыми патронами является потеря функциональных свойств объектом, лишение его подвижности и способности ведения боевых действий.

Концепция применения служебного оружия базируется на основных положениях закона об оружии Российской Федерации и нового перечня вооружения и правил использования огнестрельного оружия. Концепция применения служебного оружия определяется теми задачами, которые решают военизированные подразделения. К этим задачам относятся:

- несение охранной службы;
- профилактика и предотвращение столкновений граждан с представителями власти;
- оперативно-розыскная работа;
- проведение операции по задержанию и уничтожению банд-формирований.

В соответствии с указанными задачами подразделения МВД, ФСБ и др. должны обеспечиваться соответствующими видами огнестрельного оружия и боеприпасов.

При обеспечении порядка на улицах, предотвращении столкновений людей с правоохранительными органами и т.п., наиболее целесообразно применение огнестрельного оружия (пистолетов) и патронов с резиновыми, пластиковыми пулями или же устройств, выстреливающих слезоточивым, нервнопаралитическим и другими видами газов, а также производство шумовых, световых и других шоковых эффектов.

Для проведения оперативно-розыскных мероприятий, выявления нарушителей и преступников используют, как правило, пистолеты, снабженные патронами с пулями обыкновенного действия. Это позволяет в критической ситуации открывать предупредительный огонь и вести стрельбу на поражение.

При осуществлении операций по задержанию и уничтожению бандформирований нередко возникают ситуации, когда противник оснащён индивидуальными средствами защиты, подвижным транспортом и готов использовать встречно огнестрельное оружие. Поэтому спецподразделения должны быть оснащены как личным, так и автоматическим оружием, включая ручные и станковые пулемёты. В этих случаях для уничтожения противника требуется применение патронов со специальными пулями, способными пробивать бронежилеты, обшивку и резину автомобилей, а также шокировать противника вспышкой зажигательного состава. Поэтому концепция использования служебного оружия должна исходить из конкретно поставленных задач и определять как оружейный арсенал, так и количество и виды боеприпасов.

В соответствии с назначением гражданское оружие подразделяют на спортивное, охотничье и оружие самообороны, и его использование также регламентируется основными положениями “Закона об оружии” Российской Федерации. Спортивное оружие предназначено для тренировки спортсменов и проведения соревнований. Гладкоствольное оружие и патроны с дробовым снаряжением применяют для стендовой стрельбы по летящим керамическим тарелочкам, оружие с нарезными стволами и пулевыми патронами предназначено для выполнения различных стрелковых упражнений и поражения неподвижных мишеней. Патроны к спортивному оружию отличаются высокой сбалансированностью заряда и снаряда, повышенной точностью изготовления отдельных элементов.

Охотничье оружие предназначено для охоты на зверей и птиц. Из гладкоствольных ружей стреляют специальными патронами, которые снаряжают дробью различного размера (номера), картечью и пулями. Прицельная дальность стрельбы, как правило, не превышает 30…50 м. Нарезное оружие применяют для охоты на среднего и крупного зверя, при этом используют мощные патроны с экспансивными (разворачивающимися при соударении с целью) пулями. Такие пули наносят тяжёлые ранения и исключают потерю подранка.

Реализация концепции использования всех видов стрелковых комплексов “оружие–патрон” предполагает постоянное их совершенствование. Для боевого оружия основными направлениями совершенствования являются:

- увеличение дальности эффективной стрельбы;
- повышение пробивного и поражающего действий пуль;
- увеличение плотности огня для зенитных и авиационных систем;
- повышение кучности боя патронов;
- уменьшение габаритных размеров как оружия, так и боеприпасов.

Повышение поражающего действия пуль ведётся с учётом появления и постоянного совершенствования индивидуальных средств защиты и броневой защиты боевых машин.

Для защиты личного состава военных подразделений и правоохранительных органов в боевых условиях используют различные виды бронежилетов.

Наиболее распространёнными в боевой обстановке бронированными машинами являются боевые машины пехоты (БМП) и бронетранспортёры (БТР). Эти боевые машины по броневой защите делятся на две категории: лёгкие (общий вес до 30 т), и тяжёлые (общий вес от 30…50 т). Например, БМП М2 “Брэдли”, “Мардер-1”, БТР М113, “МСУ-80” относят к первой категории лёгких, которые имеют бронезащиту, обеспечивающую защищённость от осколков, пуль крупного калибра и частично от снарядов малокалиберной артиллерии. Корпуса и башни лёгких машин изготавливают из алюминиевых сплавов (типа 5083, 7039, АБТ и др.), а лобовые конструкции дополнительно снабжены стальными листами высокой твёрдости. В современных конструкциях броневые элементы изготавливают многослойными (гетерогенная броня); при этом каждый слой отличается характеристиками прочности и пластичности. Повысить уровень защищённости помогает отделка внутренних поверхностей отсеков пластичными материалами, исключающими тыльный скол брони и образование дополнительных поражающих осколков. Средняя толщина броневой защиты:

- для лобовых проекций – 40…50 мм;
- для бортовых и кормовых проекций – 15…20 мм;
- для участков крыши – 5…10 мм.

Боевые машины пехоты категории тяжёлых (30…50 т) имеют броневую защиту сопоставимую с защитой танка. Для них применяют стальную монолитную броню с пластичным экраном и комбинированную: сталь + керамика, алюминий + сталь + кевлар.

Для поражения уязвимых мест боевых машин к стрелковому оружию разработан комплекс патронов с бронебойно-зажигательными пулями.

При построении классификации патронов стрелкового оружия целесообразно принять структурные признаки основных эксплуатационных свойств. В общем случае к группе эксплуатационных свойств относятся следующие показатели (ГОСТ 22851-77):

1) назначение изделия, определяющее основные функции, для выполнения которых оно предназначено, и обусловливающее область его применения;

2) надёжность, характеризующая свойства безотказности, долговечности, сохраняемости и ремонтопригодности;

3) эргономичность, определяющая работоспособность системы “человек–изделие” и учитывающая комплекс свойств человека (бойца, охотника и др.), проявляющихся в процессе эксплуатации изделия;

4) безопасность, характеризующая особенности изделия, обусловливающие безопасность обслуживающего персонала;

5) транспортабельность, т.е. приспособленность изделий к перемещению в пространстве без их функционального использования;

6) экологичность, определяющая уровень вредных воздействий на окружающую среду при эксплуатации, транспортировке и хранении изделий;

7) эстетичность, характеризующая информационную выразительность, рациональность формы, целостность композиции и совершенство производственного исполнения изделия.

По основному, целевому (поражающему) назначению следует выделить боеприпасы к боевому и служебному оружию, используемому подразделениями и должностными лицами государственных органов, которым законодательством Российской Федерации разрешено применение оружия. По своему устройству патроны к служебному оружию незначительно отличаются от боевых, что даёт основание для принятия одинаковой структуры их классификации (рис. 1.1). При построении классификации в качестве основных родовидовых признаков приняты признаки системы “оружие–боеприпас–поражаемый объект”:

- оружие – его целевое назначение, мощность по величине дульной энергии, калибр, длина ствола;
- наличие и вид поражаемого объекта, включая степень его защищённости и среды поражения;
- боеприпас – наличие и вид поражающих элементов, гильзы и её материал, расположение средств воспламенения.

По мощности (величине дульной энергии) целесообразно выделение трёх групп боеприпасов к оружию с малой (<2000 Дж), средней (2000…5000 Дж) и большой (>5000 Дж) дульной энергией. Принимая во внимание, что дульная энергия зависит не только от величины заряда, но и от длины ствола и калибра оружия, следует различать боеприпасы к ствольному нарезному и гладкоствольному огнестрельному оружию (короткоствольному $К_{ст}$, длинноствольному $Д_{ст}$, малого $М_к$, среднего $С_к$ и крупного $К_к$ калибр о ви к бесствольному $Б_{ст}$ оружию (импульсным устройствам)).

Граничные значения калибров устанавливаются для каждого вида оружия в отдельности с учётом принятой меры измерения калибров. По виду оружия различают боеприпасы, предназначенные для стрельбы из пистолетов (П) и пистолетов-пулемётов (пистолетные), револьверов (Р) (револьверные), авто-

матических винтовок (А) и пулемётов (П) (автоматные), винтовок (В) и пулемётов (П) (винтовочные), крупнокалиберных снайперских винтовок (В) и пулемётов (П) (крупнокалиберные). Для разных видов оружия могут применяться одинаковые патроны.

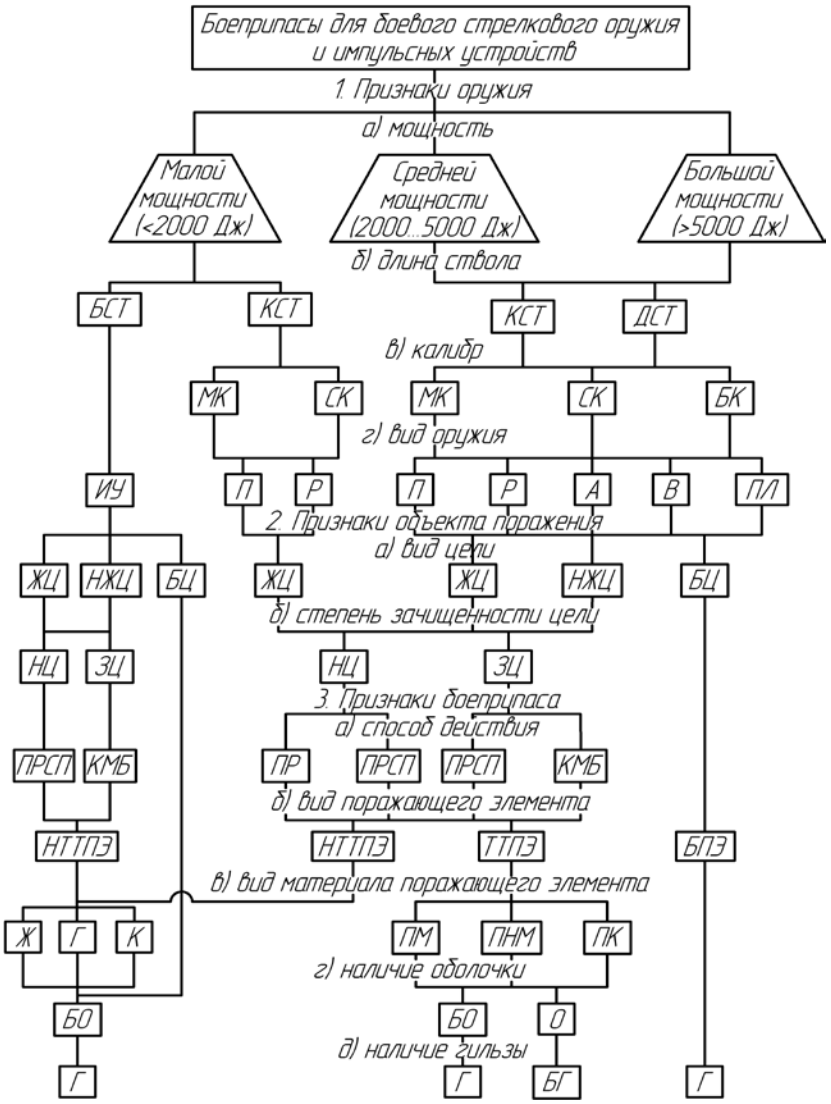


Рис. 1.1. Классификация патронов стрелкового оружия

По наличию и виду поражаемых объектов можно выделить боеприпасы, предназначенные для поражения живых (ЖЦ), неживых (НЖЦ), защищённых (ЗЦ) и незащищённых целей (НЗЦ) пулями простого, специального (ПР,

ПРСП) и комбинированного (КМБ) действия. Кроме того, следует выделить группу вспомогательных патронов, которые не предназначены для поражения объектов (учебные, холостые, образцовые, высокого давления, сигнальные, смазывающие, строительно-монтажные и т.д.).

По виду метаемых поражающих элементов следует различать патроны с твёрдотельными элементами (ТТПЭ) (пулевые, дробовые, патроны с элементами из металлических, неметаллических, композиционных материалов) и с нетвёрдотельными (НТТПЭ) в виде газообразных, жидких, смешанных сред, светолучевого действия и т.п.

По конструкции твёрдотельного поражающего элемента можно различать патроны с оболочечными (О), полуоболочечными (ПО), безоболочечными (БО) пулями. По наличию гильз в боеприпасе выделяют гильзовые (Г) (со стальной, латунной, биметаллической, пластмассовой, комбинированной гильзой) и безгильзовые (БГ) патроны.

По расположению средств воспламенения в гильзах к боеприпасам, в основном, небоевого оружия, различают патроны центрального боя и бокового огня.

В каждом из вертикальных рядов структурной классификации понятия размещаются снизу вверх по возрастающей степени обобщённости от разновидности и вида до подгруппы, группы, подкласса, класса (конечный высший уровень).

Сходимость вертикальных рядов определяет понятие “боеприпасы стрелкового оружия и импульсных устройств”. В горизонтальных рядах размещаются понятия одного порядка. На высоких уровнях классификации предусмотрен учёт наиболее общих признаков (особенностей конструкции оружия), а на нижних уровнях – тех признаков, которые присущи боеприпасам, их отдельным узлам и деталям.

По совокупности эксплуатационных признаков выделены классы – к боевому и не боевому (гражданскому и служебному) оружию; подклассы – к бесствольному, короткоствольному, длинноствольному оружию малой, средней и большой мощности; группы – к импульсным устройствам (ИУ), пистолетам (П), револьверам (Р), автоматам (А), винтовкам (В), карабинам (К), пулемётам (ПЛ) различного назначения; подгруппы – для поражения живых (ЖЦ) и неживых (НЖЦ), защищённых (ЗЩ) и незащищённых (НЗЩ) целей и для создания определённых эффектов (световых, звуковых и пр.) без поражения целей; виды – пулевые (в том числе картечные, дробовые, иглообразные и др.), простого поражающего действия (обыкновенные, трассирующие, бронебойные, зажигательные и т.п.), пулевые комбинированного действия (бронебойно-трассирующие, бронебойно-зажигательно-трассирующие и др.), непулевые простого, специального и комбинированного поражающего и не поражающего действий (пиропатроны, смазывающие патроны, газовые и др.); разновидности – безоболочечные, полуоболочечные, оболочечные пули, гильзовые и безгильзовые боеприпасы.

Приведённая структура является классификацией открытого типа и может расширяться за счёт введения дополнительных системных признаков и сокращаться при исключении из рассмотрения некоторых заявленных выше признаков. Такая классификация не только упрощает ориентацию во множестве различного рода боеприпасов, но и позволяет использовать её в качестве инструмента прогнозирования путей совершенствования конструкций патронов.

1.2. Устройство и действие патронов различного назначения

Для стрельбы из современного стрелкового оружия традиционно применяют унитарные патроны (рис. 1.2), конструкция которых включает в себя пулю, пороховой заряд, капсюль-воспламенитель и гильзу, объединяющую все элементы в единое целое. *Пуля* – метаемый из ствола оружия элемент, реализует основное функциональное назначение патрона: поражение цели, т.е. убойное, останавливающее, пробивное, зажигательное и др. действия. *Пороховой заряд* является источником энергии для метания пули, при скоротечном горении выделяет значительный объём газов и большое количество тепла. *Капсюль-воспламенитель* предназначен для воспламенения порохового заряда, обладает чувствительным к тепловому и ударному воздействию составом. *Гильза* предназначена для размещения порохового заряда, закрепления пули и капсюля, обеспечивает обтюрацию пороховых газов при выстреле.

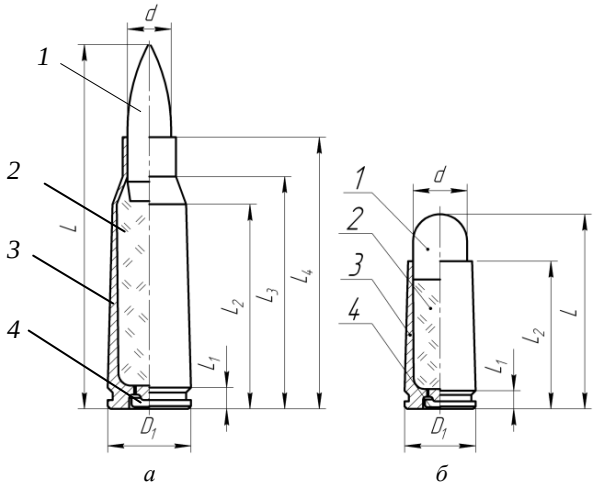


Рис. 1.2. Унитарные патроны: *а* – автоматный; *б* – пистолетный; *1* – пуля; *2* – пороховой заряд; *3* – гильза; *4* – капсюль-воспламенитель

Калибр для боевого, служебного и некоторых видов гражданского оружия измеряется в миллиметрах или дюймах и равен номинальному диаметру канала ствола, измеренному по полям нарезов. Например, трёхлинейная

винтовка С.И. Мосина (.3 дюйма) имеет калибр 7,62 мм, автомат Калашникова АК-74 – 5,45 мм, автоматическая винтовка М-16 – 5,56 мм (.22 дюйма), пистолет Кольт – 11,43 мм (.45 дюйма). Поэтому западные образцы оружия и патронов к ним нередко обозначают числом сотых долей дюйма: .22-й калибр (5,56 мм), .45-й калибр (11,43 мм).

Применяют и другие способы обозначения:

- 6,5×57R – калибр 6,5 мм, длина гильзы 57 мм с выступающим фланцем (R);
- .308 Win – калибр 0.308 дюйма, разработчик Винчестер;
- .223 Rem – калибр 0.223 дюйма, разработчик Ремингтон.

Геометрические характеристики патрона (см. рис. 1.2) определяют его надёжное вхождение в патронник и в большой мере – безотказность при стрельбе. При проектировании патрона необходимо таким образом назначить номинальные размеры и допуски на их изготовление, чтобы получить гарантированные радиальные и осевые зазоры, обеспечивающие свободное вхождение патрона в патронник, прочную деформацию гильзы при выстреле и её надёжную экстракцию.

Основное требование к патронам – эффективность действия по цели. Условно убойное действие определяется глубиной проникания в мышечную (мягкую) ткань и реализацией бокового действия, т.е. кроме раневого канала образуется зона некроза (частичного или полного омертвления) и зона молекулярного сотрясения как результат гидродинамического удара.

Убойное действие пуль в зависимости от области поражения должно обеспечиваться на дальностях стрельбы:

- 200 м для пистолетных патронов;
- 1000 м для автоматных патронов;
- 1500 м для винтовочных патронов;
- 2500 м для крупнокалиберных патронов.

Пули патронов должны обеспечивать достаточное пробивное действие при стрельбе по различным преградам, в том числе и по бронезащитам. Эти требования оговариваются в ТТТ на конкретный патрон.

Трассирующие пули предназначены для целеуказания, корректировки огня, оценки оперативной и тактической обстановки. Трассирующие пули должны создавать чётко видимую с линии огня трассу днём и ночью. Дальность трассирования, вынос трассы, её цвет определяются ТТТ на патрон. Характеристики рассеивания трассирующих пуль не должны превышать рассеивание основных пуль более чем в 1,5 раза.

Зажигательное действие специальных пуль должно обеспечивать зажжение горючего, указанного в ТТТ на патрон.

Патрон должен обладать стабильными баллистическими характеристиками. Допускаются отклонения по начальной скорости пули V_o и максимальному давлению пороховых газов (табл. 1.1).

Патрон должен быть термостабильным: после нагревания до 50°С и охлаждения до −50 °С с последующим доведением до нормальной температуры значения баллистических характеристик не должны изменяться.

Таблица 1.1

Допустимая разность между наибольшим и наименьшим значениями начальной скорости пули V_0 и максимального давления пороховых газов p_m

Патрон	ΔV_0, м/с	Δp_m, МПа
Автоматный	30…40	100
Винтовочный	30…40	100
Крупнокалиберный	30…40	100

Важнейшим требованием к оружию и патрону является обеспечение минимального рассеивания пуль при попадании в цель. Радиусы рассеивания или поперечники рассеивания зависят от множества факторов, которые, в свою очередь, зависят от конструкции и состояния оружия, вида боеприпаса, совершенства технологии его изготовления, условий стрельбы.

Комплекс “оружие–патрон” считается высококачественным, если при заданных показателях эффективности реализуется минимальный импульс отдачи. Отдача оружия является результатом реактивного взаимодействия пули и ствола и зависит от конструкции оружия, скорости и массы пули. Импульс отдачи существенно влияет не только на меткость стрельбы, но и оказывает сильное психологическое действие на стрелка. Поэтому требование по минимальному импульсу отдачи является одним из основных, предъявляемых к стрелковому комплексу в целом.

Безопасное обращение с оружием и патронами к нему предполагает строгое выполнение нормативных требований, создающих условия надежного функционирования патронов:

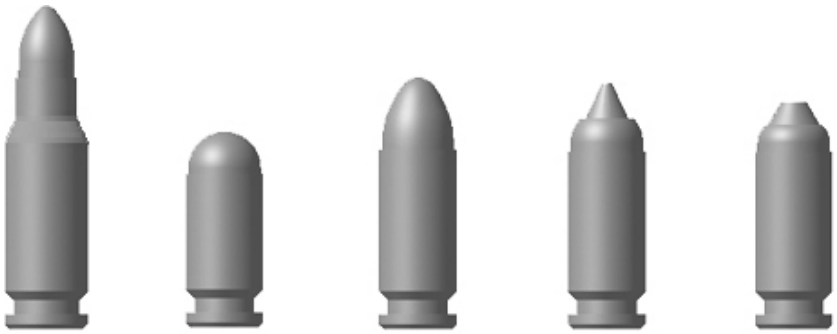
- невозможность случайного выстрела при трёхкратном перезаряжании в случае утыкания патрона в пенёк ствола;
- невозможность самопроизвольного срабатывания патронов при падении с высоты 1,5 м на бетонный пол при сохранении их функциональной пригодности;
- безопасное и надёжное функционирование патронов после 1,5 часов тряски на стандартном специальном приспособлении;
- безопасное и надёжное функционирование патронов после 180-кратного снаряжения магазинов или лент с последующим присоединением к оружию и разрядкой магазинов или лент при подаче патронов в патронник подвижными частями оружия;
- сохранение герметичности при перевозке в упаковке на дальность не менее 2000 км или после трехчасовой тряски на стандартном специальном приспособлении, после 24 часов выдержки в воде или в жидкой оружейной смазке.

Патроны должны изготавливаться из недефицитных отечественных материалов, гарантирующих функциональную стабильность при хранении в складских условиях в заводской упаковке в течение 25 лет, а при хранении россыпью, в магазинах, лентах – в течение 3 лет.

Элементы патрона должны быть химически инертны, сохранять стабильными физические свойства. Конструкция патронов должна быть технологичной, пригодной к изготовлению в условиях массового производства на имеющемся оборудовании патронных, пороховых и капсюльных заводов или при минимальном изменении их основной оснащенности.

1.2.1. Пистолетные патроны

Пистолетные патроны предназначены для стрельбы из пистолетов и пистолетов-пулемётов (рис. 1.3) и имеют, как правило, цилиндрическую гильзу с не выступающим за боковую поверхность фланцем. Бутылочная гильза принята лишь у некоторых образцов, например, у отечественного патрона клб. 7,62 мм к пистолету ТТ. Поэтому фиксацию патрона в патроннике осуществляют торцом гильзы.



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 1.3. Пистолетные патроны: *а* – 7,62 мм к пистолету ТТ; *б* – 9 мм к ПМ; *в* – 9 мм парабеллум; *г* – 9 мм-7Н21; *д* – 9 мм-7Н31

Пистолетные патроны имеют небольшую массу, невысокую мощность, дальность прицельной эффективной стрельбы не превышает 50 м, хотя убойное действие может сохраняться до 200 м и более. Калибры существующих пистолетов находятся в широком диапазоне, однако большинство боевых пистолетов имеет калибр 9 мм, обеспечивающий эффективное действие пули по цели при небольшой массе оружия.

Пистолетные патроны подразделяются на боевые, служебные и гражданские (спортивно-охотничьи).

Современные боевые патроны существенно отличаются от служебных и гражданских: они более мощные, пули снабжены термоупрочнёнными сердечниками, некоторые патроны снаряжены трассирующими пулями. Применение указанных патронов для гражданского и служебного оружия недопустимо (см. “Закон об оружии”). Основные характеристики пистолетных патронов к различным образцам отечественного и зарубежного оружия приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Основные характеристики пистолетных патронов

Тип патрона, страна	калибр, мм	m, г	$L_{патр.}$, мм	$L_г$, мм	V_0, м/с	p_m, МПа	E_0, Дж
1	2	3	4	5	6	7	8
.25 ACP Braunung, Бельгия	6,35	3,25	22,8	15,55	230	60	86
.35 ACP Braunung, Бельгия	7,65	4,7	25,0	17,20	295	90	205
Бергман-Байард, Бельгия	9,0	8,6	33,5		340	160	497
Намбу, Япония	8,0	6,6	32,0		320	135	338
.380 British Servis, Великобритания	9,0	11,6	31,6		190	70	209
НАТО	9,0	6,4	29,6		400	216	512
.455 Веблей, США	11,56	14,3	31,0		420	206	
Макаров, Россия	9,0	6,1	24,8	18,0	315	118	303
7Н21, Россия	9,0	5,3	29,7	19,15	457	274,5	553,4
7Н31, Россия	9,0	4,19	29,6	19,15	577	274,5	597,4
Токарев 57-Н-134С, Россия	7,62	5,5	34,85	24,7	430	205,4	485
ПСМ, Россия	5,45	2,4 2,5 2,6	24,9	17,80	315 315 315	100 105 110	119 124 129
9мм Luger, Германия	9,0	5,8 7,5 9,5	29,69	19,15	373 (397) 362 (404) 294 (327)	190 (255) 190 (255) 190 (255)	403 (457) 491 (612) 410 (507)
.30 Luger, Германия	7,62	6,0	29,85	21,59	390	260	456
9×21, Израиль	9,0	6,5 7,5 9,5	29,75	21,15	419 (461) 383 (413) 312 (341)	185 (245) 185 (245) 185 (245)	570 (690) 550 (639) 462 (552)
.32 S.&W. Long N.P., США	8,31	5,4 6,4	32,51	23,37	231 (258) 186 (208)	70 (95) 70 (95)	144 (179) 110 (138)
.38 S.&W. Colt N.P., США	9,0	9,5	31,50	19,69	(230)	(95)	(251)
.380 ACP, Бельгия	9,0	5,8 6,5	25,00	17,33	315 314	140 140	(287) (320)

Окончание табл. 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8
.44 Remington Magnum, США	11,0	11,7 15,6 19,4	40,39	32,64	407 (442) 372 (407) 305 (337)	200 (265) 200 (265) 200 (265)	969 (1142) 1079 (1292) 902 (1102)
AUTO, Швеция	10,0	10,0 11,7 13,0	32,00	25,20	355 (392) 328 (361) 284 (319)	180 (240) 180 (240) 180 (240)	630 (768) 629 (762) 524 (661)
.45 Winchester Magnum, США	11,43	12,0 13,0 14,9	40,01	30,43	520 (547) 551 (598) 513 (550)	215 (285) 215 (285) 215 (285)	1622 (1795) 1973 (2324) 1961 (2254)
.38 Super Auto, США	9,0	7,5 9,5	32,51	22,86	362 (402) 334 (372)	180 (240) 180 (240)	491 (606) 529 (657)
.357 Magnum, США	9,0	7,1 9,4 13,0	40,39	32,77	413 (440) 404 (447) 288 (337)	230 (305) 230 (305) 230 (305)	605 (687) 767 (939) 539 (738)
.38 Special, США	9,0	7,1 9,1 9,6	39,37	29,34	362 (403) 291 (338) 272 (307)	115 (155) 115 (155) 115 (155)	465 (576) 406 (547) 355 (452)
.45 Colt, США	11,43	11,7 13,0 14,9	40,64	32,64	341 (367) 326 (347) 301 (330)	80 (105) 80 (105) 80 (105)	680 (788) 691 (783) 675 (811)
.45 AUTO, США	11,43	10,0 13,0 14,9	32,39	22,81	320 (356) 275 (305) 262 (294)	100 (135) 100 (135) 100 (135)	512 (634) 491 (605) 511 (644)

Небольшое максимальное давление пороховых газов позволяет использовать оружие с отдачей свободного хода затвора. Масса патронов в большинстве случаев составляет 10,5…12,5 г, за исключением патронов клб. 11,43…11,56 мм и некоторых сравнительно маломощных патронов калибра меньше 9 мм. Масса пуль различна и зависит от калибра, однако коэффициент веса находится в пределах $C_q = q/d^3 = 85…100$ кН/м^3 (8,5…10 гс/см^3), что вместе с притуплённой головной частью обеспечивает надёжное останавливающее действие. При этом длина головной части пули принимается в пределах 0,5…1,0d. В баллистическом отношении такая форма для снаряда не оптимальная, однако считается приемлемой ввиду небольших дальностей стрельбы из пистолетов.

Максимальное давление пороховых газов обычно не превосходит 200…220 МПа. Импульс отдачи невелик. Например, для патрона к пистолету ПМ он составляет I_o=2,5 Н·с, для патрона Кольт клб. 11,43 мм I_o=4,0 Н·с, что при короткой гильзе позволяет использовать для перезаряжания механизм с отдачей свободного хода затвора.

Традиционно пистолетные патроны снаряжают оболочечными пулями со свинцовым или стальным сердечниками. Некоторые системы имеют трассирующие пули.

В настоящее время к боевым пистолетным патроном предъявляют повышенные требования по мощности и способности пробивать индивидуальные средства защиты. Поэтому появилось множество конструктивных разработок патронов с полуоболочечными пулями, имеющими выступающий стальной сердечник высокой твёрдости с остроконечной и притуплённой формой (например, пули к патронам 7Н21, 7Н31 клб. 9 мм). Это обеспечивает пробитие металлических защит и даёт минимальный рикошет.

Особенности применения служебного оружия в оперативной обстановке предъявляют дополнительные требования к пистолетным патронам. Пуля должна обеспечивать, прежде всего, высокое останавливающее (иногда предупредительное) действие, поэтому при сравнительно небольшой массе она должна обладать повышенной начальной скоростью, интенсивно уменьшающейся на полёте. В случае промаха пуля, быстро теряя скорость, не сможет угрожать жизни людей, случайно оказавшихся в зоне стрельбы. Разработаны конструкции облегчённых пустотелых пуль с ограниченным проникающим действием (рис. 1.4).

Для револьверов применяют патроны, в которых пуля размещена полностью в гильзе цилиндрической формы. Такая конструкция (рис. 1.5) объясняется необходимостью обтюрации пороховых газов в начальный момент выстрела, где гильза, расположенная в барабане, играет роль части ствола.

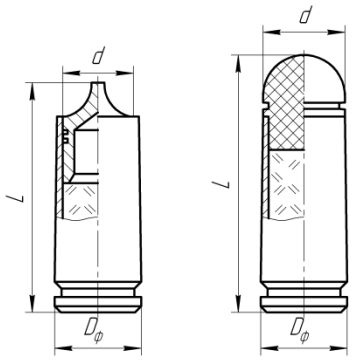


Рис. 1.4. Пистолетные патроны с безоболочечными пулями

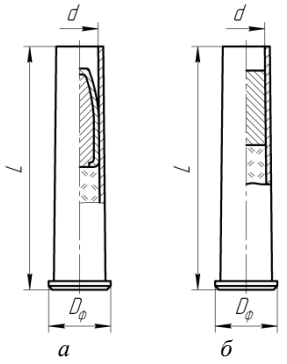


Рис. 1.5. Револьверные патроны: *а* – с оболочечной пулей; *б* – с безоболочечной пулей

1.2.2. Автоматные патроны

Автоматные патроны предназначены для стрельбы из карабинов, автоматических винтовок и ручных пулемётов. Первые образцы оружия и патронов, которые давали бы более мощный эффект по плотности огня и дальности поражающего действия по сравнению с пистолетами-пулемётами, появились в период Второй мировой войны. Наиболее удачной следует считать разработку выдающегося отечественного оружейника М.Т. Калашникова, предложившего конструкцию автомата. Здесь успешно решена задача увеличения дальности прицельной стрельбы за счёт более мощного патрона и совершенной в баллистическом отношении пули по сравнению с пистолетными образцами (рис. 1.6). В то же время меньшая в сравнении с винтовочным патроном мощность обеспечивала минимальную отдачу и устойчивость оружия при автоматической стрельбе. Эти патроны нередко называют промежуточными (между винтовочными и пистолетными). Работы по созданию

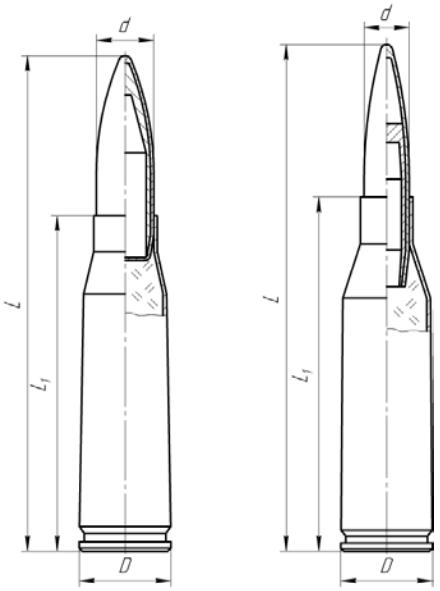


Рис. 1.6. Автоматные патроны с обыкновенными пулями: *а* – клб. 7,62 мм обр. 43 г.; *б* – клб. 5,45 мм обр. 74 г.

промежуточных патронов для автоматического оружия активно проводились за рубежом, и целый ряд образцов автоматных патронов был принят на вооружение.

В послевоенное время проведены работы по созданию автоматических стрелковых комплексов с использованием так называемых малоимпульсных патронов уменьшенного (по сравнению с клб. 7,62 мм) калибра, позволяющего улучшить настильность траектории, увеличить дальность эффективной стрельбы при небольшом силовом воздействии на оружие. Для промежуточного патрона клб. 7,62 мм импульс отдачи составляет $I_o = 9…11$ Н·с, а для отечественного патрона к автомату АК-74 клб. 5,45 мм его величина находится в пределах 5…6 Н·с. Естественно, что устойчивость оружия малого калибра повышается, дальность прямого выстрела составляет 300…400 м. Кроме того, эффективность действия достигается за счёт высокой начальной скорости пули и частичного нарушения её устойчивости при попадании в цель. В табл. 1.3 приведены основные характеристики автоматных патронов отечественных и зарубежных образцов.

Таблица 1.3

Характеристики автоматных патронов

Патрон	калибр, мм	L, мм	$M_{патр.}$, г	$m_{п.}$, г	$p_{m.}$, МПа	V_0, м/с	E_0, Дж
Россия (обр. 43г)	7,62	56,0	16,4	7,9	280	718	2070
США (М198)	5,56	57,6	11,5	3,57	320	960	1670
НАТО (SS109)	5,56	57,1	12,5	4,0	320	930	1750
(L110)тр.	5,56	57,0	12,5	4,2	320	890	1650
Россия (7Н6)	5,45	56,6	10,2	3,4	300	900	1370
(7Н10)	5,45	57,0	10,7	3,4	300	880	1370
(7Т3М)тр.	5,45	56,6	10,3	3,2	300	930	1390

Пули патронов клб. 5,45 мм 7Н6 (Россия) и клб. 5,56 мм SS109(НАТО) снабжены стальными закалёнными сердечниками практически одинаковой твёрдости. Сердечник пули SS109 имеет массу $m_{срд} = 0,60$ г, а сердечник пули 7Н6 – $m_{срд} = 1,43$ г. Однако оба патрона дают практически одинаковые показатели пробиваемости, что объясняется особенностями конструкции пули SS109 и её большей начальной скоростью (табл. 1.4). Патрон клб. 5,45 мм с пулей 7Н10 имеет штампованный сердечник из Ст. 70. На дистанции 100 м эта пуля массой 3,49…3,74 г пробивает стальную плиту толщиной 16 мм, а элементы бронежилетов из титановых сплавов – на дистанции 200 м. Кроме указанных, в номенклатуру малоимпульсных входят патроны: 7Н22 клб. 5,45 мм (Россия), Р112 клб. 5,56 мм (НАТО). Патрон 7Н22 обладает пулей с термоупрочнённым сердечником ($m_{срд} = 1,74$ г), обеспечивающим пробитие брони толщиной 5 мм на дальности 250 м. Патрон с бронебойной пу-

лей Р112 пробивает хромоникелевую сталь толщиной 6 мм на дальности 140 м. Пуля имеет томпаковую оболочку и остроконечный сердечник с $m_{срд}$ = 1,28 г. Сравнение результатов испытаний патронов с трассирующими пулями клб. 5,45 и 5,56 мм показывает, что безотказность и вынос трассы примерно одинаковы при небольшой разнице в дальности трассирования. Вынос трассы обеспечивается специальным замедлительным составом.

Таблица 1.4

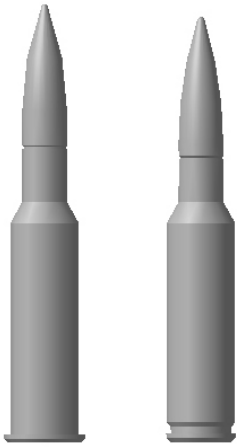
Характеристики эффективности действия малоимпульсных автоматных патронов

Наименование характеристик	5,56-мм патрон НАТО		5,45-мм патрон РФ		
	SS109 с обыкновенной пулей	L110 с трассирующей пулей	7Н6 с обыкновенной пулей	7Т3 М с трассирующей пулей	7Н10
Калибр, мм	5,56	5,56	5,45	5,45	5,45
Начальная скорость пули $V_0(V_{25})$, м/с	930	890	900	930	(880)
Дальность прямого выстрела при высоте цели 50 см, м	450	446	433	428	433
Импульс отдачи, Н·с	5,89	5,69	4,80	4,80	4,80
Дульная энергия пули, Дж	1748	1648	1373	1393	1373
Дальность пробития 80%, м:					
листа ст.3 толщина 3 мм	655…715	–	640…700	–	–
листа ст.3 толщина 5 мм	400…420	–	410…445	–	–
листа ст.3 толщина 16 мм	–	–	–	–	100
стального армейского шлема СШ-68	950	–	960	–	–
бронежилета Ж-85Т толщиной 6 мм	80	–	80	–	–
Максимальное давление пороховых газов, МПа	Не более 380	363	Не более 294	Не более 294	Не более 294
Дальность трассирования, м	–	1100	–	850	–
Вынос трассы, м	–	50…120	–	50…120	–

1.2.3. Винтовочные патроны

Винтовочные патроны предназначены для стрельбы из пулемётов и снайперских винтовок, имеют бутылочную форму гильзы и совершенные в баллистическом отношении пули. Для отечественного патрона применяют гильзу с выступающим фланцем, гарантирующим точную фиксацию патрона в патроннике и исключающим её поперечный разрыв. Однако фланцевые гильзы затрудняют работу автоматики оружия, увеличивают объём магазинов,

поэтому в настоящее время чаще используют гильзы, в которых фланец не выступает за корпус за счёт специальной кольцевой проточки (рис. 1.7).



а *б*

Рис. 1.7. Винтовочные патроны: *а* – клб. 7,62-мм (Россия); *б* – 7,62-мм (НАТО)

Номенклатура винтовочных патронов состоит:

а) для армии России:

– 7,62-мм патрон с обыкновенной пулей (ЛПС);

– 7,62-мм патрон с бронебойно-зажигательной пулей (Б-32);

– 7,62-мм патрон с трассирующей пулей;

– 7,62-мм снайперский патрон;

б) для армий стран НАТО:

– 7,62-мм патрон с обыкновенной пулей (М80);

– 7,62-мм патрон с бронебойной пулей (М61);

– 7,62-мм патрон с трассирующей пулей (М62);

– 7,62-мм снайперский патрон (М118).

До недавнего времени винтовочные патроны снаряжали пулями обыкновенного действия со стальным и свинцовым сердечниками, пулями специального действия: зажигательными, мгновенного действия и т.п. разнообразных конструкций. Основные характеристики отечественных и зарубежных образцов винтовочных патронов представлены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Характеристики винтовочных патронов

Патрон страны	Калибр, мм	L, мм	$Q_п$,г	$m_п$,г	p_m,МПа	v_0,м/с	E_0,Дж
Финляндия	7,62	75,5	26,7	13,0	270	720	3370
Япония	6,5	76,0	21,1	9,0	330	750	2531
Япония	7,71	79,7	25,8	10,5	270	790	3277
Россия:							
пуля ЛПС	7,62	77,2	21,8	9,6	300	825	3267
пуля 7Н14	7,62	77,2	22,0	9,8	300	825	3335
пуля 7БГ1	7,62	77,2	22,0	9,8	300	800	3136
НАТО:							
пуля М30	7,62	71,0	23,8	9,5	350	840	3352
пуля М61	7,62	71,0	24,0	9,6	350	850	3468

Коэффициент веса пуль, определяющий во многом мощность патрона и поражающее действие для винтовочных пуль, находится в пределах C_q=150…220 кН/м^3 (15…22 кг/см^3). Отличительной особенностью винтовочных патронов является то, что убойное действие пуль сохраняется на значи-

тельном расстоянии (до 2…3 км и более), что нередко является причиной попадания в случайную цель с летальным исходом. Импульс отдачи составляет 12…16 Н·с, что затрудняет удержание в устойчивом положении оружия, требует механического его закрепления и изнуряюще воздействует на стрелка.

Совершенство в баллистическом отношении, настильная траектория, высокая кучность боя определяют винтовочный патрон как основной с широкой номенклатурой пуль обыкновенного и специального действия, обеспечивающих поражение целей на больших дальностях. В табл. 1.6 приведены некоторые тактико-технические характеристики винтовочных патронов армий России и стран НАТО.

Таблица 1.6

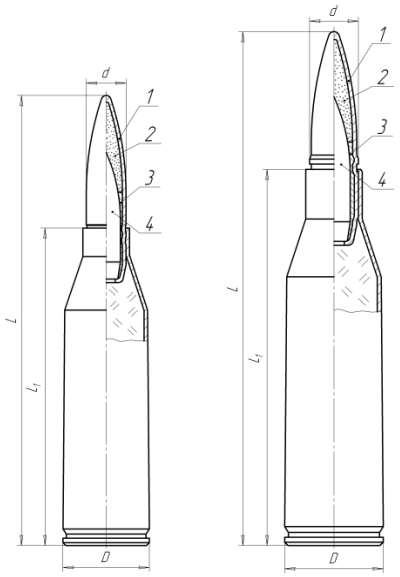
Тактико-технические характеристики винтовочных патронов

Характеристики	Россия				НАТО			
	ЛПС обыкн.со стальным серд.	Б-32 бронебойно-зажигательная	7Н1 снайперская	7Н21 трассирующая	М30 со свинц. серд.	М62 трассирующая	М61 бронебойная	М118 снайперская
Калибр, мм	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62	7,62
$m_п$, г	9,6	10,4	9,8	9,7	9,5	9,1	9,6	11,3
$V_о$, м/с	825	805	830	775	840	870	850	790
p_m, МПа	300	300	300	300	360	360	360	320
Дальность прямого выстрела, м	420	423	437	421	430	443	435	422
Импульс отдачи, Н·с	11,9	12,4	12,2	11,8	11,8	11,8	11,9	13,6
E_0, Дж	3230	3360	3310	3100	3340	3480	4290	3530
Твёрдость сердечника, HRC	20…25	63…68	–	–	–	–	62…65	–
Дальность 80% пробития, м.:								
ст.3, =3,5 мм	830	900	900	–	–	–	–	–
2П, S=10 мм	200	–	–	–	–	–	100	–
бронежилет Ж-85Е	150	800	750	–	130	–	500	130
армейский шлем СШ-68	1700	1700	1700	–	1700	–	1700	1700
Дальность трассирования, м	–	–	–	1200	–	1000	–	–

1.2.4. Крупнокалиберные патроны

Крупнокалиберные патроны (рис. 1.8) обладают большой мощностью в сравнении с другими патронами стрелкового оружия и предназначены для стрельбы из крупнокалиберных пулемётов и снайперских винтовок. Это оружие способно поражать легко бронированную и небронированную боевую и

вспомогательную технику, низколетящие воздушные цели и пр. Не менее важную задачу решает крупнокалиберное стрелковое оружие по поражению живой силы, находящейся за различными укрытиями.



а *б*

Рис. 1.8. Крупнокалиберные патроны с бронебойно-зажигательными пулями: *а* – 12,7-мм патрон (Россия); *б* – 14,5-мм патрон (Россия); *1* – оболочка; *2* – зажигательный состав; *3* – свинцовая рубашка; *4* – стальной сердечник

В основную номенклатуру крупнокалиберных патронов для армии России входят:

- 12,7-мм патрон с бронебойно-зажигательной пулей (Б-32);
- 12,7-мм патрон с бронебойно-зажигательно-трассирующей пулей (БЗТМ);
- 12,7-мм патрон с зажигательной пулей мгновенного действия (МДЗМ);
- 12,7-мм снайперский патрон;
- 14,5-мм патрон с бронебойно-зажигательной пулей (Б-32);
- 14,5-мм патрон с бронебойно-зажигательно-трассирующей пулей (БЗТМ);
- 14,5-мм патрон с зажигательной пулей мгновенного действия (МДЗ).

Крупнокалиберные патроны имеют ёмкие бутылочные гильзы с невыступающим фланцем, что обеспечивает надёжную работу автоматики оружия. В табл. 1.7 приведены основные характеристики крупнокалиберных патронов.

Таблица 1.7

Характеристики крупнокалиберных патронов

Патрон страны	Калибр, мм	L, мм	$Q_п$, г	$m_п$, г	p_m, МПа	v_o, м/с	E_o, Дж
Англия	12,7	107	85,4	37,0	290	765	10827
США	12,7	138	116,0	48,0	370	810	15746
Франция	13,2	136	120,0	52,0	300	800	16640
Россия Б-32	12,7	147	135,0	48,3	310	820	16238
МДЗ	12,7	147	130,0	43,0	300	820	14457
БС	12,7	147	145,0	56,6	370	820	18827
Бронебойная	12,7	138,4	116,0	45,9	340	890	18179
Трассирующая	12,7	138,4	114,0	41,7	370	870	15781
Зажигательная	12,7	138,4	110,6	40,3	370	900	16322
Россия Б-32	14,5	156,0	192,0	64,0	330	990	31363
БЗТМ	14,5	156,0	190,0	60,3	330	100	30150
МДЗМ	14,5	156,0	189,0	58,0	330	1000	29000

БСТ	14,5	156,0	199,0	68,5	330	990	33568
Бельгия (НАТО)	15,0	155,0	190,2	70,0	400	1065	39698

В последнее время ведутся разработки по усилению боевого могущества крупнокалиберных патронов, особенно в связи с тем, что на вооружение многих армий приняты снайперские винтовки клб. 12,7 мм. Величина импульса отдачи при стрельбе крупнокалиберными патронами значительно больше, чем у патронов среднего калибра. Поэтому, особенно при стрельбе из снайперского оружия, отдача даёт сильное болевое и сотрясающее воздействие на стрелка. С целью снижения этого негативного действия необходимо при разработке новых конструкций патронов по возможности уменьшать массу пули, а в оружии принимать специальные устройства, смягчающие удар приклада в плечо стрелка.

Использование тяжёлых пуль или пуль специального действия, способных поджигать “тяжёлое” топливо, позволяет уничтожать объекты на дистанции до 2000 м. В табл. 1.8 приведены характеристики эффективности действия крупнокалиберных патронов.

Таблица 1.8

Характеристики эффективности действия крупнокалиберных патронов

Характеристики	Россия				НАТО			
	Б-32 броне-бойно-заж.	МДЗ мгно-венного дейст-вия	БС брон.-заж. с тяж. серд.	БСТ брон-заж. с тяж. серд	АРМ8 броне-бойный	М17трас-сирую-щий	М1 зажига-тель-ный.	АР1 броне-бойный
Калибр, мм	12,7	12,7	12,7	14,5	12,7	12,7	12,7	15,0
$m_п$, г	47,4	44,0	56,6	68,5	45,9	41,7	40,3	70,0
v_o, м/с	820	820	820	990	885	875	900	1050
p_m, МПа	300	300	300	330	370	370	370	400
Дальность прямого выстрела, (высота цели 2 м)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1065
Дальность пробития брони БТР-60, м:								
бортовой 5 мм/30°	1485	–	–	2280	–	–	–	1770
лобовой 13 мм/45°	480	–	–	760	–	–	–	660
Дальность пробития БМП-765, м:								
бортовой 15 мм/0°	1265	–	–	1510	–	–	–	1170

лобовой 15 мм/56°	0	–	–	10	–	–	–	0

1.2.5. Патроны со стреловидными пулями

Патроны со стреловидными пулями разработаны для различных стрелковых систем, в том числе крупнокалиберных, и реализуют подкалиберный принцип снарядов с высоким пробивным и проникающим действиями. Стреловидная пуля имеет стальной (или из материала повышенной прочности и плотности) сердечник и оперение из лёгкого сплава.

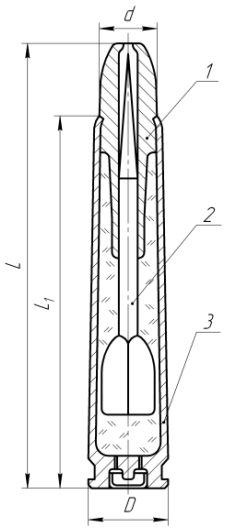


Рис. 1.9. Патрон со стреловидной пулей: *1* – поддон; *2* – пуля; *3* – гильза

По конструкции эти патроны могут быть различными, как с одной пулей, имеющей поддон тянущего типа, так и с несколькими пулями, уложенными в поддон толкающего типа.

На рис. 1.9 показана конструкция патрона с оперённой пулей, которая удерживается в гильзе с помощью секторного разъёмного поддона. Поддон состоит из двух-трёх секторов и обеспечивает ведение пули по каналу ствола и освобождение её по вылете из канала ствола. Патроны с оперённой пулей могут применяться для стрельбы как из оружия с гладким каналом ствола, так и с нарезным. Многопульные патроны при стрельбе из нарезного оружия дают большое рассеивание, так как пакет стрел получает вращение, в результате чего возникают центробежные силы, разбрасывающие стрелы по вылете из канала ствола в стороны. Поэтому эффективность стрельбы может быть высокой только на малых дальностях. Имея небольшие диаметральные размеры, оперённые пули обладают большой поперечной нагрузкой при сравнительно небольшой их массе. Однако даже на средних дистанциях стрельбы малоимпульсные патроны с оперёнными пулями обладают невысоким убойным действием из-за резкого падения скорости, хотя начальная скорость для некоторых образцов превосходит 1200 м/с.

Основными недостатками этих конструкций следует считать их низкую технологичность и наличие разъёмных поддонов, вылетающих из ствола вместе со стрелами. Элементы поддонов, изготовленные из лёгких металлов или полимеров, обладают достаточной энергией и способны нанести травму боевым расчётам, находящимся впереди стрелка. Во избежание этого в некоторых конструкциях патронов предусмотрено разрушение поддонов и превращение их в пыль, что также затрудняет ведение прицельного огня. Кроме то-

го, поддоны при отделении влияют на траекторию полёта стрел и увеличивают их рассеивание.

1.2.6. Многопульные патроны

Многопульные патроны применяют для стрельбы из нарезного оружия с целью повышения плотности огня. Различные конструктивные схемы предусматривают последовательное расположение в патроне от 2 до 5 пуль. Примером двухпульного патрона может служить американский патрон М198 клб. 7,62 мм (рис. 1.10). Он предназначен для повышения эффективности стрельбы на сравнительно небольших дальностях (до 200 м) и не заменяет других патронов того же калибра, а дополняет их. Повышение эффективности стрельбы достигается за счёт увеличения количества пуль и их определённого рассеивания, расширяющего поражаемую область. Каждая пуля имеет массу 5,4 г, в сумме 10,8 г (масса штатной пули 9,7 г). Передняя пуля имеет выемку в хвостовой части, куда входит головная часть задней пули. Из-за частичного нарушения обтюрации пороховых газов и попадания их в межпульное пространство передняя пуля получает большую начальную скорость (850 м/с), чем задняя (790 м/с), что ведёт к несовпадению центров рассеивания пуль. Кроме того, плоскость среза задней пули наклонена под углом 4,5° к поперечной плоскости, в результате чего задние пули имеют большее рассеивание по сравнению с передними. Так, средний радиус рассеивания на дальности 100 м у передних пуль 38 мм, а у задних 280 мм.

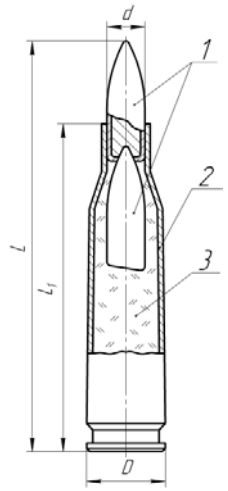


Рис. 1.10. Двупульный патрон: *1* – пули; *2*– гильза; *3* – пороховой заряд

С увеличением дальности стрельбы скорости пуль, имеющих небольшую массу, резко уменьшаются, увеличивается их рассеивание и снижается эффективность стрельбы.

1.2.7. Бесшумные патроны

Бесшумные патроны ввиду особенностей устройства (рис. 1.11) предназначены для стрельбы из короткоствольного оружия (пистолетов), так как разгон пули в стволе происходит на длине, не превышающей длину хода штока, который не может быть длиннее патронной гильзы. Основные элементы патрона: пуля *1*, гильза *2*, капсюль-воспламенитель *5*, шток-поддон *3*,

пороховой заряд *4*. Шток-поддон предназначен для выталкивания пули и запирания пороховых газов в гильзе. Гильза толстостенная, скат гильзы является уступом для остановки поршня. Капсюль-воспламенитель вставлен во втулку и удерживается замкнутой кромкой донной части гильзы. Поршень выталкивателя имеет сферическую выемку. При расширении пороховых газов стенка поршня прижимается к стенке гильзы, обеспечивая обтюрацию пороховых газов. Шток выбрасывает пулю и останавливается, упираясь в скат гильзы и блокируя выход пороховых газов. Запирание пороховых газов даёт возможность исключить звук и ограничить габариты оружия в рамках боевого пистолета.

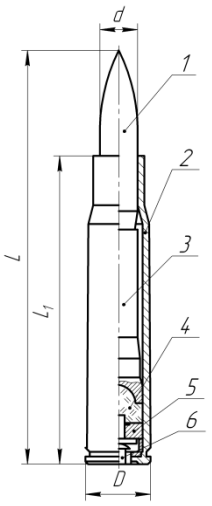


Рис. 1.11. Бесшумный патрон ПЗАМ: *1* – пуля; *2* – гильза; *3* – шток-поддон; *4* – пороховой заряд; *5* – втулка; *6* – капсюль-воспламенитель

Впервые бесшумные патроны для такого оружия были разработаны отечественными конструкторами. Как известно, источником звука является ударная волна, создаваемая головной частью пули, и истекающие из ствола пороховые газы, вызывающие колебание воздушной массы. При движении пули с дозвуковой скоростью воздушный поток обтекает головную часть, не создавая звука. Увеличение скорости пули приводит к образованию донного разряжения воздушной массы, образованию вихревых потоков, скорость которых выше скорости пули, что создаёт скачок уплотнения воздуха и усиление звука. Поэтому для снижения уровня звука следует укорачивать головную часть пули, удлиняя хвостовой конус, уменьшающий интенсивность образования вихревого потока и исключающий уплотнение воздушной массы.

Таким образом, для того чтобы снизить уровень звука выстрела, необходимо придать пуле дозвуковую скорость и в её конструкции предусмотреть удлинённый конус.

Однако при снижении начальной скорости, например, у армейского патрона клб. 5,56 мм М193 с 980 до 310 м/с резко сокращается дальность эффективной стрельбы. Это можно частично компенсировать за счёт увеличения массы пули (так, для 5,56-мм патрона масса пули увеличена с 3,56 до 5,3 г). При большой массе пули увеличивается её поперечная нагрузка, снижается потеря скорости на траектории и, следовательно, несколько возрастает эффективная дальность стрельбы. Поэтому для бесшумных патронов, разработанных на базе автоматных или винтовочных, масса пуль увеличена по

сравнению со штатными. Устойчивость пули на траектории достигается путём усиления гироскопического эффекта за счёт большой крутизны нарезов канала ствола оружия.

По достигаемому эффекту такое оружие оказалось в некоторых случаях предпочтительнее, чем оружие с глушителем. В России было разработано достаточно большое количество образцов бесшумных патронов:

- 7,62-мм патроны СП-2 и СП-3 – для стреляющего ножа НРС и двуствольного малогабаритного пистолета МСП;
- 7,62-мм патрон “Змея” ПЗ, ПЗА, ПЗАМ – для двуствольных пистолетов С-4 и С-4М “Гроза”;
- 7,62-мм патрон СП-4 для стреляющего ножа НРС-2 и самозарядного пистолета ПСС, и другие.

По существу такие патроны есть не что иное, как заряженные стволы, и при неправильном обращении представляют большую опасность по сравнению с обычными патронами. При транспортировке они укладываются в стальные контейнеры с 3-мм стенками. Не допускается бросание контейнеров с патронами и нахождение их вблизи источников теплоизлучения.

1.2.8. Патроны для подводной стрельбы

Патроны для подводной стрельбы предназначены для специального оружия, способного поражать противника под водой на сравнительно небольшой дальности (рис. 1.12). Эффективная стрельба ограничивается ухудшением видимости объектов под водой. Известно, что острота зрения в воде ухудшается в 100…200 раз. Если прозрачность воды определять по чёткой видимости цели белого цвета диаметром 400 мм, то эта цель различима в Чёрном море на расстоянии 28 м, Средиземном на 50…60 м, Балтийском на 11…13 м, в реках и озёрах это расстояние не превышает 0,5…15 м. Кроме того, скорость движения пули сильно тормозится сопротивлением воды.

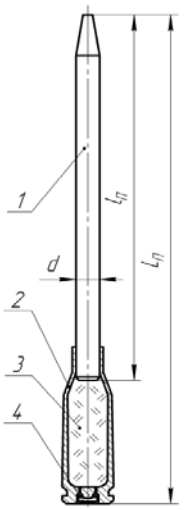


Рис. 1.12. Патрон для подводной стрельбы: *1* – пуля; *2* – гильза; *3* – пороховой заряд; *4* – капсюль-воспламенитель

Применяемое оружие предполагает использование патрона специфической конструкции, в которой пуля имеет длину $l_п = 20d$. Стабилизация пули в воде за счёт оперения или придания ей вращательного движения и использования гироскопического эффекта невозможна. Поэтому стабильное её движе-

ние может быть обеспечено за счёт глиссирования длинной кормовой части пули, создания кавитации водного потока и частичного разряжения с образованием каверны (испарения) воды (рис. 1.13). Устойчивое движение удлинённой стальной пули с конической тупоконечной вершиной-кавитатором возможно только при условии, что $V_п > 80$ м/с.

Водная среда оказывает существенное влияние на сам процесс выстрела, который условно можно разделить на два этапа:

1 – с момента начала движения пули до момента подхода площадки-кавитатора к дульному срезу (метаемая масса равна массе пули + масса столба воды, находящегося в стволе);

2 – с момента выхода кавитатора пули за дульный срез до момента вылета её из канала ствола (метаемая масса равна массе пули).

Интенсивность нарастания давления пороховых газов в 1-й период выстрела гораздо больше, чем при стрельбе в воздухе, а во 2-й период более интенсивно падение давления (рис. 1.14).

Применение таких патронов предусматривает использование коротко-ствольного оружия, так как чем длиннее ствол, тем меньше начальная скорость. Например, для патронов клб. 5,56 мм используют гладкоствольную систему с длиной ствола $L_{ств.} = 270$ мм. Патрон имеет следующие характеристики: $m_п = 16{,}5$ г, $l_п = 100$ мм, $p_m = 310$ МПа.

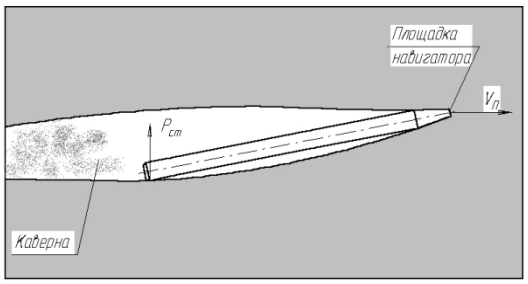


Рис. 1.13. Схема движения пули под водой

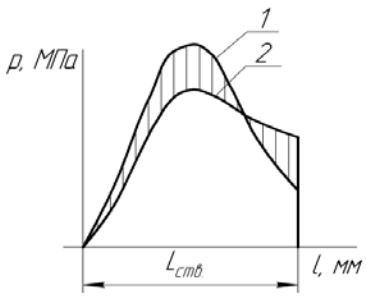


Рис. 1.14. Характер изменения давления пороховых газов при стрельбе: *1* – в воде; *2* – в воздухе

К патронам для подводной стрельбы предъявляют повышенные требования по коррозионной стойкости, герметичности и безотказности.

1.2.9. Вспомогательные патроны

Вспомогательные патроны предназначены для обучения военнослужащих обращению с оружием, имитации стрельбы, проверки прочности стволов и узлов запирания, определения баллистических характеристик стрелкового

оружия, т.е. для выполнения различных действий, не имеющих прямого отношения к поражению целей. К этим патронам относятся:

- холостые, используемые для безопасной стрельбы во время учений, манёвров и салютов (отличительный признак – отсутствие пуль);
- учебные, применяемые для тренировок по выполнению приёмов заряжания, разряжания, компоновки дисков, лент и проведения других упражнений с оружием (отличительные признаки – отсутствие пороха, пробитый капсюль, боковые продольные канавки на гильзе);
- патроны с усиленным зарядом, предназначенные для проверки прочности и осадки узла запирания оружия (пуля целиком окрашена в черный цвет);
- патроны высокого давления, предназначенные для проверки прочности стволов (пуля окрашена в желтый цвет);
- образцовые (эталонные), применяемые для проверки баллистической аппаратуры, паспортизации баллистического оружия, настройки оружия для последующего проведения испытаний (пуля окрашена в серебристый цвет);
- смазывающие, используемые для нанесения специальной смазки на поверхность канала ствола выстрелом с целью размягчения нагара после стрельбы и предотвращения отложения металла оболочки в зоне выступов и впадин нарезов (короткие поддоны, изготовленные из гильз соответствующих патронов).

Холостые патроны предназначены для имитации эффекта стрельбы во время учений, манёвров и производства салютов. Иногда они применяются в ружейных гранатомётах для выбрасывания гранат. Холостые патроны по устройству отличаются от боевых отсутствием пули либо использованием взамен пули имитатора из полиэтилена (рис. 1.15).

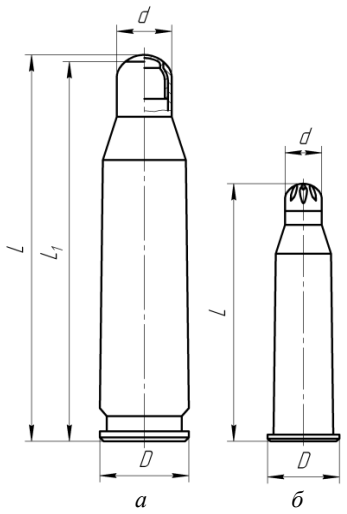


Рис. 1.15. Холостые патроны: *а* – крупнокалиберный с картонным колпаком; *б* – клб. 7,62 мм с обжатием дульца “звёздочкой”

К холостым патронам предъявляют следующие требования:

- идентичность силы звука выстрела в сравнении с боевыми патронами стрелковых систем;
- соответствующая форма и размеры, обеспечивающие возможность стрельбы из оружия без дополнительных приспособлений в механизмах подачи патронов;
- пригодность для автоматической стрельбы при наличии усилителей интенсивности действия пороховых газов на элементы автоматики;
- обеспечение безопасности стрельбы.

Необходимый уровень звука выстрела достигается за счёт применения быстросгорающего пороха и достаточной массы заряда. Для 5,45-мм и 7,62-мм обр. 43 г. патронов применяют пористый порох марки П-125, для холостых винтовочных патронов – пластинчатый порох марки Х (Пл 10-12), а для 12,7-мм и 14,5-мм холостых патронов – порох марки ВГЖ.

Нормальную работу автоматики оружия при стрельбе холостыми патронами удаётся получить за счёт дополнительных устройств – усилителей действия газов. В системах оружия с отдачей ствола это достигается установкой втулки надульника с меньшим внутренним диаметром, а в системах с отводом пороховых газов – установкой на дульной части ствола втулки для холостой стрельбы также с меньшим внутренним диаметром.

Безопасность стрельбы холостыми патронами обеспечивается тем, что в них отсутствуют пули (отечественные патроны), либо они имеют предельно ослабленные пули, которые разрушаются при вылете из канала ствола и не представляют опасности.

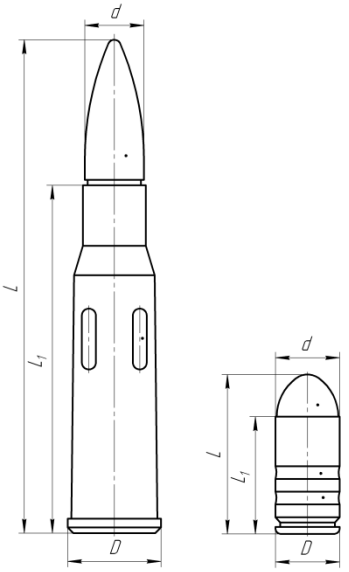
Для удержания порохового заряда дульце гильзы обжато “звёздочкой” (клб. 7,62 мм) или же заряд в гильзе закрыт в дульце колпачком (клб. 12,7 мм и 14,5 мм). При выстреле воспламеняется пороховой заряд и под давлением пороховых газов разжимается “звёздочка” либо выталкивается колпачок (имитатор), который разрушается и сгорает при вылете из канала ствола.

Учебные патроны не содержат порохового заряда и предназначены для обучения личного состава приёмам заряжания и разряжания оружия, снаряжения магазинов и лент патронами и приобретения навыков обращения с оружием. В соответствии с назначением к ним предъявляются требования полного сходства с боевыми патронами по форме и размерам, прочного соединения пули с гильзой, обеспечивающего многократное использование учебных патронов, и наличия внешних признаков, отличающих эти патроны от боевых. Характерным внешним признаком отечественных учебных патронов (рис. 1.16) является наличие на боковой поверхности продольных канавок, увеличивающих их жёсткость. Поперечные канавки на корпусе гильзы имеют 9-мм пистолетные патроны.

В учебных патронах используются пули со стальным сердечником для пистолетных 9-мм, автоматных 5,45-мм и винтовочных 7,62-мм патронов. Для учебных патронов клб. 12,7 мм применяют бронебойно-зажигательные пули, в которых зажигательный состав заменён инертным веществом, а для патронов клб. 14,5 мм вместо пуль используют оболочки к бронебойно-зажигательным пулям.

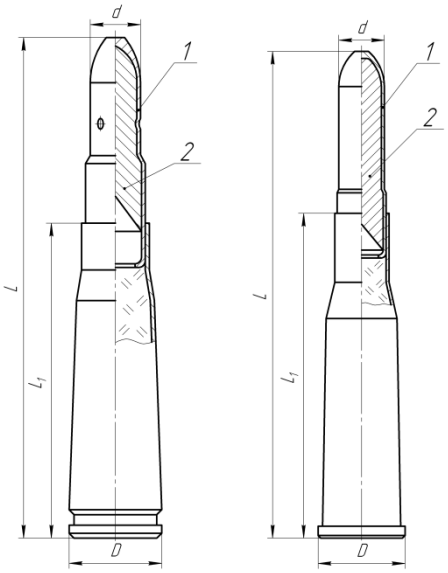
Патроны с усиленным зарядом предназначены для проверки прочности и упругой осадки узла запирания в оружии после его изготовления. Поэтому при стрельбе эти патроны способны развивать более высокое максимальное давление в сравнении с патронами валового производства за счёт порохового заряда увеличенной массы. Пули к ним не содержат зажигательных, трасси-

рующих составов и состоят из оболочки, свинцовой рубашки и стального или свинцового сердечника (рис. 1.17).



а *б*

Рис. 1.16. Учебные патроны: *а* – винтовочный клб. 7,62 мм; *б* – пистолетный клб. 9,0 мм



а *б*

Рис. 1.17. Патроны с усиленным зарядом (*а*) и высокого давления (*б*): *1* – оболочка; *2* – свинцовый сердечник

В технических условиях на изготовление патронов с усиленным зарядом обычно указываются пределы среднего уровня максимального давления $p_{\text{m.ср}}$ для баллистической группы выстрелов, приведённого к температуре $+20^{\circ}$C, а также наибольший уровень максимального давления $p_{\text{m.нб}}$.

Возможность обеспечения указанных значений давления достигается путём увеличения веса заряда либо изменения его марки или увеличением массы или длины ведущей части пули. Во избежание тугой экстракции при стрельбе патронами с усиленным зарядом рекомендуется корпус гильзы смазывать ружейной смазкой, а в целях безопасности при определения давления стрельбу вести из-за укрытия. Для отличия патронов с усиленным зарядом пули до дульца гильзы окрашивают в чёрный цвет, а на боковых стенках ящиков и на крышках коробок делается чёрной краской надпись “усиленный заряд”.

Патроны высокого давления предназначены для проверки прочности стволов после их изготовления и развивают более высокое максимальное (p_{m}) и дульное ($p_{\text{д}}$) давления в сравнении с патронами валового производства.

Техническими условиями на изготовление патронов высокого давления обычно предусматриваются пределы среднего уровня максимального давле-

ния $p_{m.ср}$. Увеличение уровня давлений достигается за счёт подбора заряда или замены его марки либо за счёт изменения массы или длины ведущей части пули. Допускается увеличение длины патрона при условии вхождения его в патронник. Скорость пули может быть любой и не измеряется. Для отличия от других патронов пули патронов высокого давления окрашивают до дульца гильзы в жёлтый цвет. Параметры некоторых патронов с усиленным зарядом и высокого давления приведены в табл. 1.9.

Патроны с усиленным зарядом и высокого давления изготавливаются небольшими партиями, не превосходящими 100 000 шт. для средних и малых калибров и 20 000 шт. для крупных калибров.

Таблица 1.9

Параметры патронов с усиленным зарядом и высокого давления

Уровни давления Мпа (кгс/см^2)	Патроны с усиленным зарядом				Патроны высокого давления			
	5,45-мм автоматный	7,62-мм винтовочный	12,7-мм	14,5-мм	5,45-мм автоматный	7,62-мм винтовочный	12,7-мм	14,5-мм
$p_{m.ср}$	338,3 (3450)	313,8 (3200)	372,6 (3800)	372,6 (3800)	392,3 (4000)	411,9 (4200)	431,5 (4400)	411,9 (4200)
$p_{m.нб}$	–	368,7 (3750)	–	–	451,0 (4600)	368,7 (3750)	–	–
$p_{m.нм}$	313,8 (3200)	–	–	–	362,8 (3700)	–	–	–
$p_{д.ср}$	-	–	–	–	73,5 (750)	53,9 (550)	71,05 (725)	71,05 (725)

Образцовые патроны предназначены для паспортизации баллистического оружия, настройки аппаратуры (хронографов) и испытания патронов и порохов. Изготовление образцовых патронов осуществляется с учётом повышенных требований к проведению технологических процессов по сравнению с валовыми.

Пули образцовых патронов по конструкции соответствуют основной номенклатуре боевых патронов и должны удовлетворять требованиям чертежей, но с половинными допусками на диаметр ведущей части и массу пули. При изготовлении образцовых патронов обеспечиваются установленные пределы отклонения массы заряда и извлекающего пулю усилия. Для отличия от других патронов вершины пуль образцовых патронов окрашивают в серебристый цвет. После изготовления и утверждения партии патронов их рассылают потребителям в герметичной упаковке. Срок их годности в качестве образцовых – пять лет. Решение о продлении срока годности принимается на основании результатов проверки баллистических характеристик и химической стойкости пороха.

Баллистические характеристики образцовых патронов устанавливают по результатам испытаний стрельбой из трёх скоростных и трёх крешерных ви-

дов баллистического оружия в течение трёх дней. При стрельбе из крешерного оружия определяются максимальное давление пороховых газов и скорость пули (для пистолетных патронов скорость пули не определяют). После проведения испытаний устанавливают:

- значение скорости пуль $v_{x.cp}$, рассчитанное как среднее арифметическое скоростей пуль при стрельбе из скоростного и крешерного оружия;
- среднее значение максимального давления пороховых газов $p_{m.cp}$, рассчитанное как среднее арифметическое из числа всех стрельб из крешерного оружия;
- максимальную разность между наибольшим и наименьшим значениями скорости пуль при стрельбе из скоростного и крешерного оружия;
- максимальную разность между наибольшим и наименьшим значениями максимального давления пороховых газов при стрельбе из крешерного оружия.

Баллистические испытания образцовых патронов проводятся в нескольких организациях по особому распоряжению. Эти испытания являются предварительными. Окончательное определение основных характеристик и утверждение партии образцовых патронов осуществляется на основании обобщения результатов проведённых стрельб и собственных испытаний организацией заказчика. К каждой партии образцовых патронов предъявляется ряд конкретных требований по баллистическим и другим характеристикам, оговариваются возможные отклонения, условия испытаний и т.п., которые записываются в техническом задании.

1.3. Технические условия на изготовление (модернизацию) патрона

Технические условия (ТУ) – неотъемлемая часть комплекта конструкторской документации.

ТУ разрабатывают на один или несколько патронов. Требования, установленные ТУ, не должны противоречить обязательным требованиям государственных стандартов. ТУ включает следующие разделы:

- вводную часть;
- технические требования;
- требования безопасности;
- требования охраны окружающей среды;
- правила приёмки;
- методы контроля;
- правила транспортирования и хранения:
- гарантийные обязательства поставщика.

Вводная часть содержит наименование патрона, его назначение, область применения и условия эксплуатации.

Технические требования – нормы, качество и потребительские характеристики патрона. Раздел состоит из подразделов: общие технические требования к патронам, технические требования к патронам, включая требования к сырью, материалам и покупным изделиям, основные параметры и характеристики, комплектность, маркировка и упаковка, а также требования к металлу, материалам для антикоррозионного покрытия и капсюлям-воспламенителям.

Подраздел *Основные параметры и характеристики* – основные баллистические параметры и характеристики патрона: среднее значение скорости пули v_x на установленном расстоянии, давление пороховых газов $p_{м\ ср}$, $p_{м\ наиб}$ кучность стрельбы на заданном расстоянии, параметры эффективности действия пули по цели и другие важные параметры, улучшающие эксплуатационные характеристики при определённых условиях, характерные отличия конструкции пуль, применяемых для поражения отдельных видов целей, а также требования по надёжности функционирования патрона в данных климатических условиях и обеспечению безопасности при эксплуатации, сроки службы и требование стойкости патрона к внешним воздействиям. Оговаривают условия применения патрона, если он снаряжён усиленным зарядом.

Подраздел *Маркировка* содержит требования к товарному знаку или стандартному обозначению калибра, обозначению партии патронов, партии пороха, указание количества патронов. Для гражданских патронов - требование к обозначению ТУ.

Раздел *Требования безопасности* – требования, которые должны содержать все виды допускаемой опасности, возникающей в течение срока хранения, транспортировки, испытаний и эксплуатации патронов.

Раздел *Требования охраны окружающей среды* – требования по предупреждению нанесения вреда окружающей среде при испытании, хранении, транспортировании и эксплуатации патронов.

Раздел *Правила приёмки* – основные категории контрольных испытаний, правила предъявления патронов представителю заказчика при приемосдаточных испытаниях, объемы и последовательность проведения приемосдаточных испытаний, виды, параметры, методы и объемы контроля и испытаний: правила приемки патронов представителем заказчика на приемосдаточных испытаниях, допускаемые виды дефектов, порядок приёмки патронов, размер предъявляемой партии и объёмы выборок. Оговариваются условия приёмки партии или её забракования, а также устанавливается место простановки клейм, штампов, пломб, подтверждающих приёмку партии.

Раздел *Методы контроля* – приёмы, способы, режимы контроля параметров и характеристик патронов. Методы и условия контроля должны быть объективными, чётко сформулированными, точными, обеспечивать последовательные и воспроизводимые результаты и быть максимально приближенными к условиям использования продукции.

Для каждого метода контроля предусматривают правила отбора проб, оборудования, последовательность подготовки к контролю, проведение контроля, методику обработки результатов. В ТУ не указывают методы и средства контроля, если они установлены в отраслевых или государственных стандартах.

Раздел *Правила транспортирования и хранения* – требования к обеспечению сохранности патронов и их безопасности для окружающей среды.

Раздел *Гарантии изготовителя* – гарантийный срок хранения и гарантийный срок эксплуатации, при которых предприятие-изготовитель гарантирует соответствие качества патронов требованиям ТУ.

В приложениях ТУ приводят перечень документов, на которые сделаны ссылки, краткое описание оборудования, материалов, стендов, необходимых для контроля патронов, требования к оружию для испытаний патронов.

ТУ, содержащие требования, которые относятся к компетенции органов госконтроля и надзора, подлежат согласованию с ними.

1.4. Технические требования к патронам

К конструктивным характеристикам и функционированию патронов предъявляются следующие требования.

В процессе эксплуатации не допускаются: разрушение элементов патронов, застревание пуль в канале ствола, затяжной выстрел (отсутствие выстрела в течение 2 с), продольные трещины на фланце и проточке гильзы, поперечные трещины под фланцем гильзы, отрыв фланца гильзы, неизвлечение гильзы, срабатывание капсюля-воспламенителя от инерционного накола, срыв с нарезов или демонтаж пуль внутри канала ствола и на траектории. При стрельбе возможны следующие уровни легко устраняемых задержек: для боевых патронов не более 0,3%; для гражданских патронов не более 1%.

Начальная скорость пуль v_0 устанавливается исходя из требования поражения цели, оптимальной настильности траектории и с учётом сопряжения траектории с траекторией основной пули. Разность между наибольшей и наименьшей скоростями в серийных патронах принимается равной $\Delta v = 30\ldots40$ м/с. Среднее значение разброса скорости назначается в пределах $\Delta v_{25\text{ср}}\left(v_{10\text{ср}}\right) = 10\ldots15$ м/с. Например, для патрона калибром 7,62 мм образца 1943 г. $v_{\text{ср}} = 710\ldots725$ м/с.

Требование к максимальному давлению пороховых газов $p_{\text{m ср}}$ назначается для отечественных патронов ручного оружия $p_{\text{m ср}}$ = 310 МПа и для патронов к станковым пулемётам $p_{\text{m ср}}$ =300...350 МПа. В патронах иностранного производства $p_{\text{m ср}}$ составляет:

- до 4500 бар для патронов охотничьих калибров;

- до 2900 бар для пистолетных патронов;
- 1500... 1800 бар для патронов к служебным пистолетам.

Извлекающее пулю усилие $P_{изв}$ назначают в следующих пределах:

- 400... 1100 Н для патронов малого калибра (до 9 мм);
- 200... 1000 Н для пистолетных патронов;
- 2500... 6000 Н для патронов крупного калибра. Требование к кучности стрельбы обусловлено назначением патрона.

Допускаемые отклонения на диаметральные и линейные размеры металлических элементов и патрона в целом устанавливают в следующих пределах:

- 0,03 мм на диаметр пули для оружия с глубиной нарезов 0,1 мм, 0,05 мм – с глубиной нарезов до 0,15 мм;
- 0,12...0,35 мм на длину гильзы;
- 0,15...0,25 мм для пистолетных патронов;
- 0,5... 1,5 мм на длину патронов, 0,26...0,52 мм для пистолетных патронов;
- 0,1...0,18 мм на диаметр фланца гильз, 0,3 мм для патронов с выступающим фланцем.

Полный объём гильзы W составляет:

- 0,72...1,05 $см^3$ для пистолетных патронов;
- 1,72… 1,84 $см^3$ для малоимпульсных патронов;
- 2,21...2,25 $см^3$ для промежуточных патронов;
- 3,49...4,10 $см^3$ для винтовочных патронов;
- 16,0...41,0 $см^3$ для патронов крупного калибра.

Патроны должны надёжно функционировать в течение гарантийного срока в любых метеорологических условиях в диапазоне температур ±50°С.

1.5. Качество патронов стрелкового оружия. Основные положения

При разработке конструкций и организации производства патронов особое внимание уделяют оценке и обеспечению их качества. Качество изготовления патронов при их серийном и массовом производстве на высокопроизводительном оборудовании – сложная методологическая, техническая и организационная задача.

Система обеспечения качества постоянно совершенствуется, но при этом всегда сохраняется важный принцип обратной связи – контроль технологического процесса и немедленное принятие мер по устранению выявленных недостатков.

Систему менеджмента качества по разработке и постановке продукции на производство определяет государственный военный стандарт Российской Федерации. Система менеджмента – скоординированная деятельность по обеспе-

чению и управлению качеством – охватывает задачи обеспечения качества проектирования, конструкторской, технологической подготовки и ведения производства, организации связей с заказчиком и потребителем патронов.

Эта система нацелена на выполнение ТТЗ заказчика и условий контрактов, соблюдение технических условий и конструкторской документации, предупреждение выпуска продукции, не соответствующей установленным требованиям, снижение непроизводительных расходов, защиту государственной тайны и т.д. В рамках системы каждое структурное подразделение разрабатывает конкретные документы, определяющие виды его деятельности, направленной на повышение качества выпускаемой продукции.

Планирование процессов жизненного цикла патронов должно быть согласовано с процессами менеджмента качества. Должны быть определены цели в области качества, необходимость разработки процессов менеджмента, а также обеспечения их ресурсами, необходимые структура и средства контроля и испытаний, критерии приёмки продукции. Предприятие должно постоянно поддерживать связь с заказчиком: получать информацию по эксплуатации патронов, знать запросы заказчика и своевременно реагировать на его замечания по качеству патронов.

Оценка качества патронов – сложный методологический процесс, включающий в себя методику контроля и оценки его результатов. При разработке документов по качеству военной продукции используют следующие термины и определения элементов качества патронов.

Серийная и массовая продукция оценивается не поштучно, а партиями. Под единицей продукции серийного производства понимают определённое, оговоренное техническими условиями количество патронов, которое одновременно оценивают по результатам приёмочных испытаний.

Годной считается продукция, удовлетворяющая требованиям конструкторской документации. При этом в процессе испытаний или контроля выявляют допустимые отклонения, дефект или критический дефект.

Допустимые отклонения – это отклонения действительного значения показателя качества продукции от номинальной величины. Отклонение считается допустимым, если фактическое численное значение показателя качества или параметра продукции не выходит за пределы, установленные нормативно-технической документацией.

Под дефектом понимают несоответствие продукции требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

Малозначительный дефект – дефект, который не оказывает существенного влияния на использование патронов по назначению.

Исправимый дефект – дефект, устранение которого технически возможно и экономически целесообразно.

Критический дефект – дефект, при наличии которого использование патронов по назначению практически невозможно или опасно.

На стадии производства и выпуска военной продукции её качество подвергается контролю. Целями контроля патронов в процессе производства являются обеспечение выпуска патронов, соответствующих техническим условиям, предупреждение производственного брака, получение информации о качестве готовой продукции и состоянии технологического процесса.

Задача контроля качества патронов заключается в проверке соответствия количественных и качественных характеристик всем требованиям (нормам, методам, видам контроля, правилам), установленным в конструкторской, технологической документации.

Объекты контроля в процессе производства – составные части патронов, материалы, полуфабрикаты, комплектующие изделия, технологические процессы, средства контроля, технологическое оборудование, оснастка, рабочий инструмент.

Служба технического контроля предприятия, кроме контрольных операций, указанных в технологической документации и ТУ, должна вести учёт выявленных дефектов, анализировать брак и причины его возникновения. В процессе производства элементов патрона и готовых изделий осуществляют следующие виды технического контроля: входной, операционный, приёмочный.

Входной контроль проводят по документации поставщика с целью определить пригодность продукции для дальнейших операций.

Цель операционного контроля, проводимого после конкретной операции, – выявление и своевременное предотвращение отступлений от требований технологической документации. В процессе операционного контроля проверяют режимы выполнения операции, параметры полуфабрикатов и т.д. Готовые детали или партии деталей принимает ОТК и определяет их пригодность для проведения сборочных операций.

Цель аттестации технологических процессов – обеспечение стабильности качества патронов.

При контроле конструкторской и технологической документации проверяют полноту проведенных изменений, физическое состояние документации и ее комплектность, пригодность к размножению.

Средства контроля проверяют на их соответствие нормативно-технической документации по метрологическому обеспечению.

Периодически по специальным графикам контролируют технологическое оборудование, оснастку.

Готовые патроны, сформированные в партии, подвергают системе испытаний.

1.6. Виды и методы испытания патронов стрелкового оружия

Испытания патронов – процесс, реализуемый на объектах механическими и математическими средствами. При этом используют следующие необходимые понятия и определения.

Программы испытаний включают цели и задачи испытаний, описание объекта и условия испытаний, порядок проведения и обеспечения испытаний, объем, последовательность и методики проведения, порядок обработки результатов, форму и порядок отчетности.

Испытания (контроль) партии патронов – экспериментальное определение количественных и качественных характеристик свойств объекта испытаний при его функционировании или при моделировании объекта испытаний и воздействии различных факторов.

Объект испытаний – продукция или её часть (выборка), проба, непосредственно подвергаемая испытаниям. Патрон, процесс, явление, математическая модель должны находиться в определённом соответствии с объектом испытаний или воздействии на него и замещать их в процессе испытаний. Если патрон изготовлен по вновь разработанной конструкторской документации и новому технологическому процессу, то он называется "опытным образцом". На практике для определения характеристик внешней и внутренней баллистики для испытаний изготавливают "макет" разрывной пули без взрывчатого вещества

Условия испытаний – совокупность внешних факторов или режимов функционирования объекта при испытаниях.

Вид испытаний – классификационная группировка испытаний по определённому признаку.

Категория испытаний – вид испытаний, характеризуемый организационным признаком их проведения и принятия решения по результатам объекта в целом. Например, на приёмосдаточных испытаниях по результатам оценки выборки (части партии) оценивают всю партию патронов.

Некоторые категории испытаний (например, типовые) чаще всего проводят по определенным программам. Программа испытаний – организационно-методический документ, устанавливающий цель, объект, метод проводимых экспериментов, средства и условия испытаний, их объём.

Метод испытаний – правила применения определенных принципов и средств испытаний.

Методика испытаний – организационно-методический документ, устанавливающий метод испытаний, средства и условия испытаний, отбор проб, алгоритм выполнения операций по определению одной или нескольких взаимосвязанных характеристик свойств объекта, формы представления данных результатов, требования техники безопасности и охраны окружающей среды. Методики испытаний разрабатывают на основе ТЗ и утверждённых программ с использованием типовых методик. В программе испытаний обязательно указывают средства испытаний: технические устройства, вещества или материалы, необходимые для проведения испытаний.

Программы испытаний должны быть оформлены для каждой категории испытаний в виде единого документа и содержать перечни конкретных про-

верок, которые следует осуществлять для подтверждения выполнения требований ТЗ.

Для серийного и массового выпуска патронов с целью установления их пригодности к использованию в соответствии с требованиями конструкторской документации устанавливают следующие категории испытаний:

- квалификационные;
- приемосдаточные;
- периодические;
- типовые.

Каждая категория испытаний может включать в себя одну или несколько групп (подгрупп) испытаний (механические, электрические, климатические на надежность), содержащих один или несколько видов испытаний (визуальный, измерительный), которые могут проводиться в один или несколько этапов. Виды испытаний и контроля, последовательность их проведения, контролируемые параметры и нормы на них устанавливаются в соответствии с конструкторской документацией.

Квалификационными называют испытания первой серийной партии вновь разработанных или модернизируемых патронов, проводимые при постановке их на производство.

Цели испытаний первой серийной партии патронов:

- оценка готовности завода-изготовителя к выпуску патронов в заданном объеме;
- подтверждение соответствия патронов требованиям конструкторской документации:
- оценка проведенных мероприятий по устранению недостатков выявленных на государственных испытаниях опытных образцов;
- проверка надежности разработанных технологических процессов изготовления патронов и их элементов.

Количество патронов, подвергающихся испытаниям, виды и методики испытаний, последовательность должны соответствовать требованиям конструкторской документации. Выборку патронов для квалификационных испытаний отбирают от объема партии, прошедшей контроль, предусмотренный приемосдаточными испытаниями. Результаты квалификационных испытаний оформляют актом, который подписывает комиссия по проведению испытаний.

Приемосдаточные испытания патронов проводят с целью контроля партий патронов на соответствие требованиям ТУ, установленным для данной категории испытаний, а также контрольным образцам.

На каждый вид недостатка (дефекта) патрона предусматривают два контрольных образца: с минимальной и максимальной степенью недостатка. Патроны, имеющие степень недостатка ниже минимального, допускаются без ограничения, выше максимального – не допускаются. Патроны, отобранные в качестве контрольных образцов, должны быть оформлены паспортом, кото-

рый подписывают представитель заказчика (ПЗ), руководитель предприятия-изготовителя, начальник отдела технического контроля (ОТК). Приемосдаточные испытания проводит ПЗ силами и средствами предприятия-изготовителя в присутствии представителя ОТК. Объем и последовательность испытания патронов предусмотрены ТУ. Результаты испытаний оформляют соответствующим протоколом.

При получении отрицательных результатов испытаний ПЗ возвращает партию заводу-изготовителю для выявления причин несоответствия требованиям ТУ, проведения мероприятий по их устранению, определения возможности исправления, о чем делается отметка в извещении на партию. Возвращенная партия после устранения дефектов подвергается повторной проверке ОТК (предъявительским испытаниям).

Повторные приемосдаточные испытания проводят в полном объеме, предусмотренном ТУ. В технически обоснованных случаях, в зависимости от характера дефекта, ПЗ может назначить повторные испытания только по тем пунктам, по которым выявлены несоответствия изделий установленным ТУ требованиям. Указанное правило может применяться в случаях, не снижающих показатели качества принимаемой продукции, если технические обоснования принятых решений оформлены документально. Партия патронов, не выдержавшая повторных испытаний, бракуется и изолируется от годных.

Приемосдаточные испытания гражданских патронов проводит ОТК предприятия-изготовителя на соответствие конструкторской документации по перечисленным выше правилам. Цели *периодических* испытаний:

- периодический контроль качества выпускаемой продукции;
- контроль стабильности технологических процессов изготовления элементов и сборки патрона;
- подтверждение возможности продолжения изготовления и приемки патронов по действующей конструкторской и технологической документации.

Испытания в объеме и последовательности, которые установлены ТУ на патрон, проводит предприятие-изготовитель с участием ПЗ.

Периодичность испытаний указывается в ТУ или в контрактах на поставку продукции.

Если партия патронов удовлетворяет требованиям конструкторской документации, то считается подтвержденной возможность дальнейшего изготовления и приемки продукции по той же документации, по которой она изготовлена.

Если патроны не выдерживают периодических испытаний, то приемку и отгрузку принятой продукции приостанавливают, анализируют результаты периодических испытаний для выявления характера и причин появления дефектов, составляют план по их устранению. Повторные периодические испытания должны быть проведены на доработанных патронах в полном объеме, после чего оформляют акт в установленном порядке.

Типовые испытания проводит предприятие-изготовитель или организация заказчика для оценки целесообразности предлагаемых изменений в конструкторской или технологической документации. Необходимость проведения типовых испытаний совместным решением определяют предприятие-разработчик, предприятие-изготовитель и ПЗ.

Программу испытания разрабатывает предприятие-изготовитель и подписывают лица, которые в установленном порядке утверждают изменения в конструкторской и технологической документации на патрон.

Содержание программы испытаний:

- перечень необходимых испытаний из состава приемосдаточных;
- требования к количеству патронов, необходимых для проведения испытаний;
- перечень необходимых сравнительных испытаний;
- указание об использовании патронов, оставшихся после проведения испытаний.

Результаты испытаний оформляют актом (отчетом). Если результаты испытаний положительны, то в конструкторскую или технологическую документацию вносят предлагаемые изменения. При отрицательных результатах испытаний документация не подлежит изменению.

Предъявительские испытания – составная часть приемосдаточных – проводятся ОТК предприятия-изготовителя по конструкторской документации на патрон. При положительных результатах партия патронов предъявляется ПЗ на приемосдаточные испытания. Результаты испытаний оформляют протоколом.

1.6.1. Испытания опытных образцов патронов

При выполнении ОКР опытные партии патронов подвергают предварительным и государственным испытаниям.

Цель *предварительных* испытаний – оценка соответствия опытной партии патронов требованиям ТЗ, а также готовности патронов к государственным испытаниям.

Предварительным испытаниям подвергают образцы патронов, которые проверены ОТК и ПЗ в объеме выборок, необходимых для оценки качества опытных патронов. Исполнитель ОКР извещает заказчика о готовности патронов к предварительным испытания. Как правило, предварительные испытания проводит комиссия в составе представителя исполнителя ОКР, представителя организации, проводящей испытания, ПЗ.

Испытания проходят на полигонах, в специализированных институтах, испытательных центрах заказчика или промышленности.

Программа предварительных испытаний должна содержать следующие разделы:

- объект испытания;
- цель испытания;
- общие положения;
- объем испытания;
- условия и порядок проведения испытаний;
- материально-техническое и метрологическое обеспечение испытаний.

Результаты испытаний оформляют актом и другими документами, предусмотренными программой испытаний. Оценка результатов испытаний должна содержать конкретные, точные формулировки, указания о невыполненных требованиях ТТЗ (ТЗ), пути устранения выявленных дефектов, необходимость разработки специальных мероприятий по доработке конструкции и технологии изготовления патрона.

В ходе выполнения ОКР непосредственно перед проведением предварительных испытаний исполнитель проводит необходимые оценочные испытания. Цель оценочных испытаний – проверка соответствия опытных патронов заданным ТТЗ параметрам, оценка эффективности действия по цели, определение диапазона возможностей полученных характеристик.

Например, если для одного из образцов патрона задана характеристика пробития броневого листа марки 2П толщиной 10 мм на дальности 1000 м с эффективностью 80%, то на оценочных испытаниях определяют возможность и эффективность пробития этого листа на дальностях 1100 м , 1200 м.

Оценочные испытания проводят по специальным планам, согласованным с ПЗ.

Цели *государственных* испытаний:

- оценка боевых возможностей;
- проверка и подтверждение тактико-технических и эксплуатационных характеристик;
- разработка рекомендаций о возможности принятия образцов патронов на вооружение.

Государственные испытания организует заказчик, который несет ответственность за их проведение. Испытания могут проводиться на полигонах, в специализированных институтах и испытательных центрах заказчика, в войсковых частях, а также в испытательных центрах промышленности.

Государственные испытания проводят государственные комиссии, назначаемые совместным решением заказчика и головного исполнителя. Председатель комиссии – представитель заказчика.

При проведении государственных испытаний на полигонах и в специализированных институтах заказчика порядок, сроки и место проведения испытаний, а также состав комиссии заказчик определяет специальным приказом.

Предъявляемая на государственные испытания опытная партия патронов должна быть подтверждена положительными результатами предварительных испытаний.

Программа и методики испытаний, объем испытуемых патронов должны соответствовать ТУ. Результаты испытаний оформляют протоколами, актами и другими документами, предусмотренными программой испытаний.

1.6.2. Сертификационные испытания патронов к гражданскому и служебному оружию

При сертификационном испытании патронов к гражданскому и служебному оружию осуществляют следующие виды контроля:

- основных характеристик типа патрона;
- средств измерения;
- технологии изготовления;
- инспекционный.

Для контроля основных характеристик типа патрона формируют выборку из разных упаковок от партии патронов в количестве не менее 3 тыс. шт.

При положительных результатах контроля на первичной упаковке партии патронов наносится специальный знак соответствия.

При контроле средств измерения проверяют:

- соответствие размеров баллистических стволов размерам, приведенным в таблицах Постоянной международной комиссии (ПМК)[*];
- средства измерения давления с использованием образцовых патронов и калиброванных баллистических стволов;
- геометрические размеры калибров и приборов, предназначенных для контроля размеров патрона и оружия, используемых при контроле безопасности функционирования.

Контроль основных характеристик типа патрона и средств измерения проводится на государственной испытательной станции (ГИС).

Контролю технологии изготовления на соответствие требованиям ТУ, разработанных для каждого типа патронов, а также контрольным образцам подвергается каждая партия патронов. Контроль осуществляется на контрольно-испытательной станции предприятия-изготовителя, аккредитованной на независимость и компетентность.

Инспекционному контролю подвергается партия патронов заявителя, получившего право проводить контроль изготовления и наносить знак соответствия на первичной упаковке патронов. Контроль проводится на ГИС не реже одного раза в три года для одной партии патронов. При инспекционном контроле проверяется технология изготовления. Сертификационные испытания проводятся в объеме и последовательности, которые предусмотрены ТУ, с обязательным контролем параметров, указанных в табл. 1.10.

---

[*] Брюссельская международная конвенция введена в действие на территории Российской Федерации от 20 ноября 1992 года №891 «О присоединении Российской Федерации к Брюссельской конвенции о взаимном признании испытательных клейм ручного огнестрельного оружия». Текст конвенции опубликован в журнале «Стандарты и качество», 1998, №9.

Кроме этих параметров определяют начальную скорость пули, массу заряда, массу патрона и пули, кучность стрельбы, транспортабельность, герметичность (если указано в конструкторской документации).

Таблица 1.10

Контролируемые параметры и объемы выборки

Контролируемые параметры	Размеры выборки при объеме партии, шт.			
	До 3500	От 3500 до 150000	От 150000 до 500 000	От 500 000 до 1500 000
Содержание маркировки, внешний вид, размеры	250 (125)	400 (200)	630 (315)	1000 (500)
Давление пороховых газов	40 (20)	60 (30)	60 (30)	100 (50)
Безопасность функционирования	40 (20)	64 (32)	64 (32)	100 (50)

Примечание. Цифры в скобках – количество патронов, подлежащих контролю.

Результаты контроля считаются положительными, если количество недостатков не превышает указанного в ТУ.

Маркировку контролируют визуально на соответствие ТУ: наличие и четкость маркировки на первичной упаковке, наименования или знака изготовителя, обозначения патронов, номера партии и количества патронов в упаковке, знака соответствия. Упаковка должна иметь дополнительное обозначение для патронов, у которых $p_{m\ ср}$ превышает предусмотренные таблицами ПМК для данного наименования патрона. На донной части гильзы (торцевой поверхности) проверяют наличие товарного знака изготовителя, обозначения калибра или наименования патрона, года изготовления (две последние цифры) на отечественных патронах. Патроны, снаряженные повторно, должны иметь соответствующий знак.

Внешний вид контролируют визуально по контрольным образцам.

Контроль размеров проводят по следующим параметрам и размерам:

- конфигурация патрона;
- длина основного корпуса гильзы;
- длина гильзы;
- высота и диаметр фланца;
- диаметр гильзы у проточки;
- диаметр дульца;
- длина патрона;
- диаметр ведущей части пули;
- диаметр и высота проточки.

Контроль размеров производится калибрами, указанными в таблицах ПМК. При этом используют основные и допускные калибры и приборы из комплекта контрольно-измерительного инструмента.

Контроль давления пороховых газов патронов центрального боя к нарезному оружию проводят с применением баллистических стволов под соответ-

ствующий патрон с "зеркальным" зазором не более 0,10 мм, с размерами патронника и канала ствола, указанными в таблице ПМК. Длина баллистического ствола составляет 600 ± 10 мм под патроны с гильзой с проточкой и фланцем, 650 ± 10 мм под патроны с донной частью гильзы типа "Магнум".

Место измерения давления пороховых газов определяется следующими расстояниями от зеркала затвора:

- 25 мм при длине гильзы более 40 мм;
- 17,5 мм при длине гильзы от 30 до 40 мм;
- от 7,5 мм до 3/4 длины гильзы при длине гильзы менее 30 мм.

При контроле технологии изготовления патронов стрельбу ведут с измерением давления при любых погодных условиях, при контроле основных характеристик – с измерением давления в нормальных условиях, т.е. при температуре воздуха $t = 21 \pm 1°C$ и относительной влажности 60±5%. Перед стрельбой патроны выдерживаются в нормальных условиях в течение 24 ч.

Контроль безопасности функционирования при контроле основных характеристик типа патрона и инспекционном контроле проводят с помощью эталонного ствола или оружия. При этом размеры патронника должны находиться в пределах, указанных в таблицах ПМК.

Перечисленные ниже дефекты, выявленные при стрельбе, следует считать критическими:

- прорыв пороховых газов через узел запирания;
- застревание пули в стволе;
- разрушение гильзы в патроннике;
- полное вскрытие корпуса гильзы;
- разрушение донной части гильзы.

В документах, по которым проводят испытания патронов любой категории, указывают:

- требования к патронам, подлежащим контролю, включая требования по безопасности, охране здоровья и окружающей среды;
- категории, виды испытаний, включая состав проверок, последовательность их проведения и распределение проверок по категориям испытаний;
- планы контроля, сроки и периодичность проведения испытаний;
- методы испытаний, условия, режимы;
- требования к средствам испытаний;
- требования по порядку отбора выборок, проб;
- порядок обработки данных, полученных при контроле; правила и условия приема патронов и их браковки.

1.6.3. Средства испытаний

Средства испытаний и состав испытательного оборудования указывают в технических условиях на каждый вид изделий. Требования на средства испытаний и оборудование изложены в ТУ или в общей нормативно-технической документации. К наиболее важным средствам испытаний следует отнести:

- оружие, предназначенное для стрельбы испытываемыми патронами;
- баллистические комплексы для определения скорости пули, давления пороховых газов, элементов внешней баллистики патронов;
- стенды для имитации условий транспортировки изделий;
- стенды для контроля качества капсюлей-воспламенителей (КВ) и капсюлей-детонаторов (КД);
- специальные и универсальные метрологические средства контроля;
- термокамеры для выдержки патронов при определенной температуре;
- стенды для определения герметичности патронов;
- оборудование специальной лаборатории для определения качества материалов и его химического состава.

Кроме того, к средствам испытаний относятся вспомогательное оборудование и стенды, применяемые при контроле специального действия патронов.

1.7. Технологичность конструкции патронов и их элементов

1.7.1. Технологическое обеспечение качества патронов

Под качеством изделия понимают совокупность его свойств, обусловливающих пригодность изделия удовлетворять определенные потребности в соответствии с его назначением (ГОСТ 15467-79). Количественные характеристики этих свойств называют показателями качества изделий. Эти показатели могут выражаться в различных единицах. Различают показатели качества изделий единичные, т.е. по одному из свойств продукции, и комплексные, относящиеся к нескольким свойствам.

При традиционном подходе учитывают следующие главные группы свойств, проявляемые в пределах жизненного цикла изделия.

В процессах:

- конструирования – конструктивные;
- изготовления – технологические;
- эксплуатации, технического обслуживания и ремонта – эксплуатационные;
- сбыта – производственно-экономические.
- утилизации – экологические.

К группе основных эксплуатационных показателей качества относятся показатели (ГОСТ 22851-77) назначения, надежности, безопасности, эргономичности, транспортабельности, экологические, а также показатели стандартизации и унификации, патентно-правовые и некоторые другие.

К показателям назначения относятся показатели качества функционирования технических систем, отражающие степень приспособленности системы к выполнению основных функций. Вид показателя качества функционирования и его значение во многом определяются целью, которую стремятся достичь при решении задачи создания технического устройства. Показатель качества функционирования выражает меру полезности системы. В процессе эксплуатации изделия изменяется его состояние, а следовательно, в каждом новом состоянии оно может выполнять свои функции с иным, определенным уровнем качества.

Номенклатура группы показателей надежности определена ГОСТ 27.202-83.

Конструктивные свойства (показатели конструктивных свойств различной физической природы): геометрические, механические, физико-химические и другие – служат определенными истинными или условными мерами оценки эксплуатационных свойств. Так, например, для суждения об устойчивости и прочности оболочки конструктор вместо допустимого избыточного давления устанавливает обоснованные требования по допустимым значениям характеристик прочности материала (пределам упругости, текучести, прочности).

Технологические свойства изделия определяются известным понятием технологичности конструкции изделия (ТКИ) (ГОСТ 14.205-83), характеризующим его пригодность к изготовлению, техническому обслуживанию, восстановлению и ремонту при обязательном обеспечении всех его эксплуатационных свойств с оптимальными затратами ресурсов.

Понятие ремонта можно рассматривать в контексте организации дополнительного производства патронов на основе использования демонтированных элементов в целом непригодных патронов.

При анализе возможностей технологического обеспечения качества и надежности изделий принимается во внимание следующее:

- формирование и изменение свойств объекта технологии осуществляется на протяжении всего его жизненного цикла, т.е. от стадии изготовления полуфабриката в виде проката до стадии изготовления конечного продукта, его хранения, эксплуатации, возможной стадии восстановления и ремонта;
- накопление количественных изменений характеристик объекта технологии приводит к определенным изменениям состояния, в частности при достижении их критических значений – к технологическим и эксплуатационным отказам;
- любое изменение физико-механических свойств металлических изделий при внешнем воздействии на них определяется изменением структуры метал-

ла (деградация структуры металла изделия, появление в нем внутренних напряжений сопровождается, как следствие, непрерывным образованием и ростом при пластической деформации микронесплошностей в виде микротрещин и микропор и при критическом объеме поврежденности разрушением металла).

Повышение технологичности конструкции изделия обеспечивает значительное снижение расхода материалов, применение наиболее простых и экономичных способов изготовления, наименьшее число технологических операций, количество рабочих и технологического оборудования, наименьшую трудоемкость при наиболее высокой производительности и, в конечном итоге, наименьшую себестоимость изготовления патронов.

Изготовление патронов стрелкового оружия осуществляется в соответствии с чертежами и техническими условиями (ТУ) на изготовление и прием патронов. Чертеж патрона – это комплект чертежей элементов и самого патрона, а также перечень материалов и условий, обеспечивающих качественное изготовление патронов. Неотъемлемым дополнением к чертежу является ТУ на изготовление и приемку патронов.

С технологической точки зрения оптимизация нагружаемой конструкции изделия и его элементов заключается в нахождении конструктивных и технологических решений, обеспечивающих при имеющихся производственных возможностях наивыгоднейшее для данных условий эксплуатации сочетание показателей работоспособности деталей. В соответствии с вышесказанным выполнение работ по технологическому обеспечению конструкции проектируемого изделия начинается с нахождения показателей работоспособности. Прежде всего необходимо установить зоны возникновения возможных повреждений деталей при эксплуатации, а также причины и характер возникающих в них нарушений работоспособности, состав конструктивно-технологических параметров, влияющих на работоспособность.

Исходную информацию технолог может получить с помощью анализа чертежей изделия, технических условий, описания устройства, инструкций по его эксплуатации; совещаний с конструкторами, ознакомления с результатами их расчетов и испытаний при отработке опытной конструкции или ее аналогов; совещаний с эксплуатационниками, работниками служб надежности и ремонта изделий, а также с помощью собственных предварительных технологических и натурных испытаний работоспособности различных элементов конструкции данной детали.

Технология изготовления элементов патрона и их сборка должны обеспечивать максимальное приближение реальных боевых и баллистических характеристик патрона к запроектированным.

К технологическим факторам, оказывающим влияние на эксплуатационные свойства патронов и на возможность появления отказов при их функционировании, относятся [1]:

- свойства и качество исходных материалов, применяемых для изготовления элементов патрона;
- методы и способы изготовления элементов патрона и сборки (монтажа и снаряжения) пуль и патронов;
- режимы обработки на технологических операциях (степень, скорость деформации, условия контактного трения на штамповочных операциях, режимы термической и химической обработки);
- качество и точность изготовления штампового инструмента;
- состояние станочно-прессового оборудования, автоматических линий и агрегатов;
- совершенство контроля качества изготовления патронов и его элементов, и технологических процессов.

Боевые качества патрона (надежность, скорострельность) во многом определяются эксплуатационными свойствами гильзы. На легкость вхождения и точность фиксации патрона в патроннике при назначенном способе фиксации существенное влияние оказывает технология сборочных операций. Отклонения от заданных диаметральных и линейных размеров гильзы и патрона, возникающих на штамповочных операциях (вытяжке, штамповке дна, обжиме гильзы и патрона), могут привести к неполному вхождению патрона в патронник с вызовом в системе «недокрытия» или к провалу патрона в патронник с возможным появлением осечек. При изготовлении гильз с заниженными прочностными и повышенными пластическими свойствами возможно повышенное смятие опорных конструктивных элементов гильзы (закраины, ската, уступа) и неточная по этой причине фиксация патрона в патроннике. Причинами отклонения механических свойств материала гильзы от нормы могут служить недостаточная степень наклепа на операции «штамповка дна», повышенная температура отжига верхней части заготовки гильзы перед обжимом или после него. Неточная фиксация патрона в патроннике вызывает изменение начального зазора, влияющего в свою очередь на условия обтюрации, прочность и экстракцию.

При стрельбе из оружия с высоким темпом стрельбы, с высокими скоростями досылания и торможения в патроннике возможен демонтаж или даже потеря устойчивости гильзы патрона при неудовлетворительных режимах проведения технологических операций по изготовлению и капсюлированию гильз и обжиме патронов.

Демонтаж патрона может выразиться в выпадении капсюля при его неплотной запрессовке, так как при подаче патрона в патронник на капсюль действуют значительные силы инерции. Надежность удержания капсюля обеспечивается кернением в трех точках или кернением по окружности капсюльного гнезда.

Демонтаж патрона может произойти и вследствие выпадения пули при досылании патрона в патронник в момент ударного торможения в автоматиче-

ских системах. Повышение темпа стрельбы за счет сокращения времени на экстракцию стреляной гильзы и досылание патрона неизбежно связано с повышением осевых нагрузок, действующих на патрон в начале и в конце его движения.

Одним из основных факторов повышения надежности от распатронирования является увеличение минимального предела пулеизвлекающего усилия $P_{изв}$. Надежность скрепления гильзы и пули в первую очередь определяется способом крепления пули в гильзе. В ряде случаев, как, например, у большинства пистолетных патронов, пуля не подвергается специальному креплению и достаточно надежно удерживается силами трения с натягом. Крепление пули кернением не позволяет получить пулеизвлекающее усилие более 200…400 Н (20…40 кгс), что не обеспечивает надежной работы автоматического оружия при двойной ленточной подаче патронов.

Более надежным способом крепления является завальцовка кромки дульца гильзы в кольцевую канавку (накатку) пули. Этот способ позволяет получать у винтовочных патронов большое пулеизвлекающее усилие, обеспечивающее нормальную работу автоматического оружия с нормальным темпом стрельбы при всех типах и способах подачи патронов.

При больших темпах стрельбы, какими обычно обладает зенитное и автоматическое оружие, требуется еще более прочное крепление пули. Для этого применяется завальцовка стенки дульца в одну или две кольцевые канавки пули или обжим дульца с завальцовкой кромки. Усилие извлечения при наличии канавок для закатывания дульца повышается в 2,5…4,0 и более раз по сравнению с усилием, определяемым лишь одной запрессовкой пули в дульце с определенным натягом. При применении всех способов существенное влияние на величину $P_{изв}$ оказывает технология проведения операций обжима дульца, так как в зависимости от нее изменяются значения предела текучести материала дульца $\sigma_S^д$ и контактного давления натяга q.

Сборочная операция, обусловливающая дополнительный наклеп металла дульца, также будет влиять на величину извлекающего усилия.

Механические свойства металла дульца гильзы определяются степенью деформации в верхнем расчетном сечении после последней вытяжки, режимами отжига перед первым и последующими обжимами, степенью деформации на обжимных операциях и режимом отжига после последнего обжима, если он назначается Заключительный отжиг дульца применяется в некоторых случаях для латунных гильз и предназначен для снятия остаточных напряжений и формирования окончательных механических свойств готовой гильзы. Определенное влияние на величину $P_{изв}$ оказывают релаксационные явления, протекающие в стенках дульца гильз при их длительном хранении. Если металл гильзы имеет недостаточную релаксационную устойчивость, то при длительном хранении упругие деформации переходят в пластические, что

сопровождается падением контактных напряжений q и уменьшением $P_{изв}$. Установлено, что релаксационная устойчивость зависит от материала, степени деформации и режима отжига.

В то же время значительное увеличение пулеизвлекающего усилия приводит к преждевременному заклиниванию гильзы и ухудшает условия прочности и экстракции гильзы. При больших значениях пулеизвлекающего усилия в большей степени наблюдается его разброс по величине, что приводит к разбросу значений максимального давления, начальной скорости и увеличивает рассеивание пуль.

При выборе способа крепления пуль выбирают тот, который обеспечивает наибольшую работу извлечения пули из дульца при относительно небольших значениях самого усилия. С этой точки зрения выгодно увеличивать ширину кольцевой канавки на пуле, где обжимается и завальцовывается дульце гильзы.

Неудовлетворительная технология капсюлирования и штамповки дна может привести к осечкам. Технологическими причинами осечек является отсутствие наковален в гильзах или их отклонение от заданной высоты и формы. Отсутствие наковален вызывается либо поломкой инструмента, либо отрывом наковальни вследствие применения инструмента с малыми радиусами закругления рабочих кромок на операции штамповка дна.

Существенное влияние на обеспечение условий обтюрации, экстракции и прочности оказывают технология изготовления металлических элементов патрона и, главным образом, технология процессов штамповки и термообработки, качество исходного металла.

Чтобы обеспечить надежную экстракцию, необходимо получить большую упругую разгрузку корпуса гильзы. После выстрела упругая разгрузка будет тем выше, чем выше значения предела текучести материала корпуса гильзы. Величина предела текучести готовой гильзы зависит от свойств материала и режимов его последующей термомеханической обработки. С целью обеспечения достаточной жесткости дно гильзы должно обладать высокими упругими свойствами, определяемыми принятыми технологическими схемами штамповки дна и величиной степени деформации. Как известно из практики эксплуатации стрелкового оружия, поперечные разрывы гильз возникают в редких случаях. Этот отказ относится к совершенно недопустимым, особенно для оружия ближнего боя. При поперечном разрыве оторвавшаяся часть гильзы остается в патроннике, что приводит к длительной задержке ведения огня.

Из анализа функционирования гильзы при выстреле следует, что защемление верхней части гильзы, при котором возможны ее осевая остаточная пластическая деформация и поперечное разрушение (обрыв), будет при условии

$$P_{дн} < P_{ск} + P_{тр},$$

где $P_{дн}$, $P_{ск}$, $P_{тр}$ – соответственно силы давления пороховых газов на дно, скат и сила трения, возникающая между стенками гильзы и патронника.

В этом случае выбор зеркального зазора между гильзой и узлом запирания будет происходить при определенном давлении пороховых газов только за счет осевых деформаций стенок корпуса гильзы. Величина давления пороховых газов в свою очередь определяется пулеизвлекающим усилием.

На поперечную прочность гильзы оказывают влияние величина давления пороховых газов на дно гильзы и патронник, степень упрочнения нижней части корпуса, геометрические параметры гильзы и патронника, величина зеркального зазора, деформация узла запирания, состояние поверхности корпуса.

На состояние поверхности гильзы влияет технология нанесения антикоррозионного покрытия. При некачественном покрытии возможны защемление корпуса и значительная осевая деформация придонного участка. В некоторых случаях причиной поперечного разрыва может служить придонная складка, которая образуется на вытяжке и последующей штамповке дна.

Существенное влияние на обеспечение условия продольной прочности от действия продольных сил гильзы в опасном сечении оказывает технология изготовления гильзы и, в частности, реализуемая схема формирования механических свойств (прочности и пластичности) в этом сечении. Условие продольной прочности в терминах феноменологической теории разрушения, т.е. в виде уравнения баланса ресурса пластичности металла, наглядно иллюстрирует это положение:

$$\omega_{i\text{Т}}^{j} + \omega_{i}^{j} \le \left[\omega_{i\text{э}}^{j}\right] = \frac{1}{K_{\omega}},$$

где $\omega_{i\text{т}}$, $\omega_{i\text{э}}$ – коэффициенты использования ресурса пластичности металла в j-м опасном сечении, характеризующие его технологическую и эксплуатационную поврежденность в пределах жизненного цикла изделия; $[\omega_i^j]$ – допустимое значение коэффициента использования ресурса пластичности; K_{ω} – коэффициент запаса ($K_{\omega} > 1{,}0$), учитывающий условия нагружения изделия.

Технологическая поврежденность включает в себя поврежденность металла исходного листового проката и накапливаемую поврежденность при реализации всех технологических циклов обработки определенного конструктивного элемента гильзы. Эксплуатационная поврежденность выражает дополнительную поврежденность металла, появляющуюся в результате дополнительной пластической деформации при функционировании гильзы в патроннике. При этом

$$\omega_{i\text{Т}}^{j} = \left[\frac{\left(e_{i\ \text{эф}}^{j}\right)_{i}}{\left(e_{i\text{р}}^{j}\right)_{i} - \left(e_{i\text{эф}}\right)_{i-1}}\right]^{a},$$

где $(e^j_{i\text{р}})_i$ – предельная до разрушения степень деформации на заключительной штамповочной операции; $(e^j_{i\text{эф}})_i$, $(e_{i\text{эф}})_{i\text{-}1}$ – накопленная степень деформации, характеризующая деформационное упрочнение металла (эффективные степени деформации) на i-м и i-1-м циклах обработки; a – коэффициент, учитывающий влияние свойств материала и схемы напряженного состояния K на интенсивность накопления поврежденности в металле.

На отдельном цикле обработки

$$e^j_{i\text{эф}} = e^j_i\,(1\text{-}\,K^j_{\text{т}}),$$

где $K_{\text{т}}$ – коэффициент, учитывающий влияние термической обработки на разупрочнение деформированного металла. Эксплуатационная поврежденность металла описывается аналогичным соотношением

$$\omega^j_{i\text{э}} = \left[\frac{\left(e^j_{i\text{эф}}\right)_i}{\left(e^j_{i\text{р}}\right)_{\text{ф}} - \left(e_{i\text{эф}}\right)_i}\right]^{a_{\text{ф}}},$$

где $(e^j_{i\text{эф}})_{\text{ф}}$, $(e^j_{i\text{р}})_{\text{ф}}$, $a_{\text{ф}}$ – параметры деформации, проявляемые при функционировании в j-м опасном сечении.

Отклонение в режимах термомеханической обработки верхней части гильзы может привести к заклиниванию большей части поверхности гильзы, чем при нормальных режимах, и к увеличению сил трения $P_{\text{тр}}$. При увеличении пулеизвлекающего усилия $P_{\text{изв}}$ возрастает максимальное давление, что также может способствовать заклиниванию гильзы и увеличению осевых деформаций.

Отрицательное влияние на условия функционирования патронов оказывает неравномерность распределения механических свойств по сечению гильз, вызываемая отклонением от оптимальных условий штамповки (по величинам и неравномерности деформации, геометрии инструмента). Наибольшая неравномерность механических свойств по толщине стенки гильз создается при вытяжке полуфабрикатов с небольшими степенями деформации в матрицах с большими углами конусности. Неравномерность деформации по сечению детали приводит к появлению остаточных растягивающих напряжений, наибольших в окружном направлении, отрицательно влияющих на условия длительного хранения, способствуя развитию коррозионного растрескивания латунных гильз.

Существенно влияют на условия функционирования принятые допуски на размеры деталей, на разностенность, разнодонность и отклонения от допусков, что определяется точностью и качеством выполнения штамповочных операций. Изменение размеров полуфабрикатов в пределах заданных допусков приводит к разбросу по степени деформации и механическим свойствам в контрольных сечениях и заметному отклонению последних от заданных по чертежу величин. Основное влияние на разброс степени деформации и харак-

теристик механических свойств оказывает разностенность деталей по периметру корпуса.

Одним из видов технических отказов является возникновение на гильзах продольных трещин во время стрельбы. Недопустимо появление продольных трещин в придонном участке с переходом на проточку и фланец. Через такие трещины возможны прорыв пороховых газов, опасность ранения стрелка, задержка экстрактирования гильз, поломка деталей автоматики стрелкового оружия. Опыт эксплуатации оружия показывает, что трещины такого рода в основном появляются при стрельбе в условиях низких температур (до -50°C).

Технологическими причинами появления этого вида отказов могут служить: а) отклонение от оптимального режима термообработки штампованных полуфабрикатов гильз и формирование в опасных сечениях гильзы неблагоприятной структуры (для стали с участками пластинчатого перлита и выделениями по границам зерен структурно свободного цементита, с участками неоднородной крупнокристаллической структуры; б) наличие в металле крупных неметаллических включений порядка 4…5 баллов по шкале эталонов); в) большая разностенность; г) значительное упрочнение корпуса и малый запас пластичности.

При стрельбе иногда наблюдаются случаи поперечного разрыва оболочки (демонтажа пули) в месте сопряжения головной части с ее ведущей частью, а также случаи срыва пуль с нарезов.

В первом случае сердечник с головной частью оболочки вылетает отдельно от остальной части пули, не получает достаточного вращательного движения и не обладает устойчивым полетом. Известны также случаи преждевременного срабатывания в стволе крупнокалиберных пуль мгновенного действия в результате осевого смещения пироэлементов пули внутри оболочки под действием давления пороховых газов, действующего на отверстие в хвостовой части пули. Поэтому следует считать, что разрыв оболочки в пулях со стальным сердечником является результатом прежде всего осевого смещения сердечника под действием давления пороховых газов через отверстие хвостовой части в процессе врезания пули в нарезы канала ствола.

Существенное влияние на поперечную прочность оказывает плотность монтажа пули: калибровкой, конусованием, обжимом хвостовой части. Например, для обеспечения надежности монтажа на поверхности пиростакана пули МДЗ клб. 14,5 мм предусмотрено рифление.

При срыве пуль с нарезов они не получают достаточной скорости вращения для обеспечения устойчивого полета, кувыркаются на траектории, значительно рассеиваясь, и обычно не долетают до цели.

Условие прочности ведущего устройства и невозможности срыва пули с нарезов имеет вид

$$\sigma_{ср} < [\sigma].$$

К технологическим факторам, влияющим на обеспечение этого условия прочности, относятся толщина стенки ведущей части пульной оболочки и ее твердость. Большая толщина оболочки, а также высокая твердость ее ведущей части могут стать причиной срыва пули с нарезов. Это связано с увеличением работы пластической деформации при внедрении выступов нарезов ствола в оболочку и, как следствие, возрастанием давления пороховых газов. Последнее вызывает рост напряжений со стороны боковой грани нарезов на выступ ведущей части оболочки. Опытные данные свидетельствуют о том, что при колебании толщины стенки оболочки и даже ее твердости в пределах допуска напряжения среза могут изменяться в пределах 15…25% и создать критические условия стрельбы с повышением вероятности срыва пуль с нарезов.

По вылете из канала ствола пуля приобретает значительную скорость вращения. В результате этого в оболочке и свинцовой рубашке возникают центробежные силы инерции. Из-за большой плотности свинца и небольшого сопротивления его разрыву давление свинцовой рубашки на оболочку может быть значительным. Существенным является тот фактор, что при наличии разностенности наибольшая часть свинца при монтаже пули сосредотачивается в зоне минимальной толщины стенки оболочки. В канале ствола центробежные силы уравниваются реакцией ствола. При полете пули по траектории эти силы вызывают в оболочке действие тангенциальных растягивающих напряжений, которые при определенных условиях могут привести к сильной деформации или нарушению прочности, к дестабилизации устойчивого полета на траектории, т.е. к новому виду отказа.

Условие предотвращения этого вида отказа

$$\sigma_\theta < [\sigma] = 0{,}7...0{,}8\sigma_в,$$

где σ_θ – тангенциальное растягивающее напряжение, действующее в стенке ведущей части оболочки по вылете пули из канала ствола (именно в этот момент действуют максимальные центробежные силы).

К основным технологическим факторам, влияющим на тангенциальное σ_θ и допустимое $[\sigma_\theta]$ напряжения, относятся разностенность оболочки $(S_{max} - S_{min})/S_o$, механические свойства материала оболочки $\sigma_в$, неоднородность этих свойств в сечении $(\sigma_{в max} - \sigma_{в min})/\sigma_в$.

Точность и единообразие баллистических характеристик пуль в полете, определяющих величину рассеивания пуль, определяют следующие факторы:

- точность и единообразие весовых, линейных, геометрических и объемных характеристик элементов пули и патрона;
- плотность монтажа и равномерность распределения массы пули;
- баллистические свойства пороха и качество капсюля-воспламенителя;
- величина пулеизвлекающего усилия;

- механические свойства и однородность их распределения в готовых элементах;
- относительная влажность и температура воздуха при снаряжении патронов.

Определяющим фактором высокой кучности боя патронов заданной конструкции является высокое качество технологических процессов их изготовления и строгое соблюдение заданных режимов обработки, обеспечивающих необходимую точность и единообразие баллистических характеристик пуль. На точность и единообразие весовых, линейных, объемных и геометрических параметров влияют технология процессов штамповки и других механических операций, точность изготовления рабочего инструмента, при проектировании которого учитывают возможные упругие и тепловые деформации, степень износа.

Точность и единообразие изготавливаемых элементов пули влияет на положение ее центра массы. Одним из факторов, определяющим устойчивый и правильный полет пули, является обеспечение единообразия соотношений полярного и экваториального моментов инерций, которые зависят, главным образом, от смещения (разброса) центра массы пули в осевом и радиальном направлениях.

Величина смещения центра массы пуль, влияющего на кучность боя, зависит от точности и единообразия следующих параметров: диаметра и толщины вершины оболочки, несоосности оживальной части и конуса пули по отношению к ведущей части, косины торца пули, разностенности оболочки; плотности монтажа элементов пули, длины пули и др.

Иллюстрацией к вышесказанному служат результаты оценки кучности боя при различных числовых и качественных значениях конструктивно-технологических параметров (КТП) пули, приведенные в табл. 1.11 по данным К.Т. Макаровой.

Таблица 1.11

Влияние определяющих конструктивно-технологических параметров (КТП) на кучность боя 7,62-мм патронов

Вид КТП	Числовое (качественное) значение КТП	Показатель кучности боя, см	
		R_{50}	R_{100}
Разброс центра тяжести пули, %	0,1	8,1	21,0
	0,3	9,7	24,0
	0,5	11,2	26,0
Несоосность, мм	0,08	8,3	15,3
	0,15	9,8	23,2
Косина торца пули, мм	0,06	–	6,2
	0,10	–	6,7

	Более 0,10	–	7,2
Качество монтажа пули	С плотной загибкой кромки оболочки	–	7,0
	С неплотной загибкой кромки оболочки	–	8,5

Повысить кучность можно за счет сокращения разброса положения центра массы, повышения точности изготовления элементов пуль и 100% контроля основных размерных параметров полуфабрикатов и готовых элементов пуль.

Задача ограничения допуска по массе решается за счет рассортировки элементов пуль по массе с точностью до 0,022 г и комплектования последних при монтаже с учетом среднего веса пули. Этот метод позволяет сократить допуск по массе до 0,05 г. Существенное влияние на кучность оказывает плотность монтажа, под которой понимают степень монолитности. Качественное содержание показателя плотности монтажа заключается в получении требуемой формы пули и отсутствии в пуле местных несплошностей (зазоров) между элементами. Плотность монтажа зависит от соответствия размеров элементов пули и инструмента на монтажных операциях, механических свойств материалов элементов, состояния поверхности элементов и других факторов. Ухудшение кучности боя при неплотной загибке кромок оболочки объясняется возможным нарушением правильности формы конусной части пули, влиянием пороховых газов, входящих в зазор между оболочкой и сердечником. На плотность монтажа влияет количество переходов на монтажных штамповочных операциях (загибке, конусовании–обжиме, калибровке и др.).

На плотность монтажа влияет состояние поверхности сопрягаемых элементов пули. Применение графитизации сердечника способствует снижению коэффициента трения при запрессовке сердечника, что улучшает заполняемость объема и формы.

Экспериментальными исследованиями установлено, что абсолютная величина пулеизвлекающего усилия не оказывает существенного влияния на рассеивание пуль. Однако при этом установлено несовпадение средних точек попадания пуль с различными пулеизвлекающими усилиями. Это несовпадение объясняется при прочих равных условиях влиянием изменяющейся начальной скорости пули на траекторию полета. При стрельбе патронами с разбросом пулеизвлекающего усилия кучность боя ухудшается.

Разброс пулеизвлекающего усилия зависит от: шероховатости и чистоты внутренней поверхности дульца, единообразия сопрягаемых диаметральных размеров гильзы и пули, механических свойств материалов дульца гильзы и ведущей части пульной оболочки, разностенности дульца, формы накатного пояска и других факторов. С увеличением разностенности разброс пулеизв-

лекающих усилий возрастает. Наименьший разброс соответствует разностенности до 0,03 мм.

Некачественное изготовление элементов пули и проведение ее монтажа, изготовление бронебойных сердечников с низкой твердостью, слабая запрессовка пиросостава приводят к неудовлетворительной бронепробиваемости или к несрабатыванию трассирующих или зажигательных пуль.

1.7.2. Методические основы обеспечения технологичности конструкции патронов

Основные понятия и определения. Технологичность конструкции изделия (ТКИ) согласно наиболее принятой в научно-технической литературе и стандартах (ЕСТПП) терминологии есть совокупность свойств конструкции изделия, определяющая пригодность изделия для производства, эксплуатации и ремонта с оптимальными затратами всех видов ресурсов при обязательном обеспечении всех заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ.

По области проявления технологичности конструкции изделий различают производственную, эксплуатационную и ремонтную технологичности. Производственная ТКИ характеризует пригодность конструкции изделия к сокращению ресурсов и времени на технологическую подготовку производства, процессы изготовления, сборки (монтажа и снаряжения) изделия, эксплуатационная ТКИ – на техническое обслуживание, текущий ремонт, хранение и транспортирование, диагностирование и утилизацию изделия; ремонтная ТКИ – на все виды ремонта, кроме текущего.

Все вышесказанное, по существу, определяет пригодность конструкции изделия к реализации на всех этапах его жизненного цикла, от чертежа изделия до материального объекта и вторичного сырья, получаемого из отработавшего свой срок изделия.

Обеспечение технологичности конструкции изделия – функция технологической подготовки производства, предусматривающая взаимосвязанное решение конструкционных и технологических задач, направленных на повышение производительности труда, достижение оптимальных трудовых и материальных затрат и сокращение времени на производство, в том числе на техническое обслуживание вне производства (ГОСТ 14201-83)

Изделие, являясь объектом проектирования, проходит ряд стадий:

1 - выполнение научно-исследовательской работы (НИР);
2 - разработка технического задания;
3 - разработка технического предложения;
4 - разработка технической документации на опытный образец (макет);
5 - разработка предварительного технологического проекта;

6 - разработка технологии изготовления опытного образца (макета).

7 - разработка и создание технологической оснастки для изготовления опытного образца (макета);

8 - изготовление и испытание опытного образца (макета);

9 - разработка конструкторской документации на серию;

10 - разработка технологической документации на серию;

11 - разработка и изготовление технологической оснастки на серию;

12 - изготовление установочной партии, начало серийного производства.

При этом под опытным образцом (макетом) понимается изделие, воспроизводящее разрабатываемое изделие или его составные части в масштабе и объеме, необходимых для проверки принципов их работы при выполнении проектной или рабочей документации. Образец изделия в условиях единичного производства представляет изделие, изготовленное по рабочей (конструкторской и технологической) документации и отвечающее всем заданным эксплуатационным требованиям.

При выполнении НИР выбирают оптимальные технические решения для нового изделия с учетом технологии его изготовления, в том числе по разработке, при необходимости новых материалов, комплектующих изделий и прогрессивных ресурсосберегающих технологий.

Техническое задание служит исходным документом для проведения опытно-конструкторских работ (ОКР). В результате ОКР должна быть разработана конструкторская документация. Проектная конструкторская документация (техническое предложение, эскизный и технический проекты) содержит данные, необходимые для разработки конструкции изделия, рабочая конструкторская документация – данные, необходимые для его изготовления.

На стадии ОКР выполняют также технологическую подготовку производства проектируемого изделия. Параллельно с разработкой проектно-конструкторской документации (КД) разрабатывают предварительный проект технологической документации (ТД), включающий основные технологические решения и новые технологические процессы, которые будут приняты при производстве нового изделия. При разработке КД на опытные образцы одновременно разрабатывают технологию и технологическую оснастку для их изготовления. Такая параллельная работа конструкторов и технологов на стадии ОКР позволяет ускорить процесс освоения нового изделия. При этом требуется четкая координация всего комплекса работ по конструкторской, технологической и организационной подготовке производства.

Общий порядок разработки, согласования и утверждения технических заданий, проведения экспертизы технической документации, испытания опытных образцов (опытных партий), выдачи разрешений для постановки на производство новых изделий, а также проведения контрольных испытаний изделий серийного производства установлены государственными и отраслевыми

стандартами. Постановку на производство продукции по лицензии осуществляют также по соответствующим стандартам.

Изделия, подлежащие разработке и постановке на производство, по техническому уровню и качеству должны соответствовать требованиям высшей категории качества к моменту освоения их производства.

Следует иметь в виду, что технологичность – понятие относительное и зависит от вида изделия, типа производства, уровня технологии производства. Изделия, рассматриваемые как объект проектирования, производства и эксплуатации, могут быть различного вида, что существенно влияет на содержание задач, решаемых при отработке на технологичность. Согласно ГОСТ 2.101-68 изделия подразделяются на детали, сборочные единицы, комплексы и комплекты. Относительность понятия технологичности характеризуется свойствами технологической рациональности и преемственности конструкции изделия. Технологическая рациональность конструкции изделия представляет собой совокупность тех свойств изделия, которые выражают технологичность его конструкции с точки зрения соответствия конструктивных решений только конкретным условиям и возможностям производства, эксплуатации и ремонта.

При отработке на технологичность конструкции изделия, являющегося объектом технологии производства, учитываются:

- виды и методы получения исходных заготовок;
- методы и способы обработки заготовок, реализуемые в технологическом процессе;
- методы сборки изделий;
- методы контроля и испытаний; возможность использования типовых технологических процессов;
- применение стандартных допусков и посадок;
- конструкторские и технологические базы;
- возможность механизации и автоматизации процессов изготовления и технологической подготовки производства;
- условия материального обеспечения производства;
- требуемая квалификация рабочих кадров.

В этом случае обеспечивается эффективный принцип создания конструкции нового изделия под существующую технологию изготовления изделий-аналогов по основному назначению или изделий другого назначения, но технологически подобных. Из практики известно, что технологии обновляются в более длительные сроки, чем сами изделия. В связи с этим указанный принцип является и актуальным, и обязательным. Во многих случаях экономичнее адаптировать изделие под известную технологию, а не, наоборот, создавать новую технологию под изделие.

Преемственность конструкции изделия представляет совокупность свойств изделия, выражающих его технологичность с точки зрения единства повторяемости и изменяемости, принятых в ней инженерных решений. Эти свойства, в частности, характеризуют:

- единство повторяемости составных частей в данном конструктивном исполнении изделия или рассматриваемом множестве его исполнений и применяемости в них новых составных частей, обусловленных новизной требований к изделию или множеству его исполнений по функциональному назначению, условиям производства или эксплуатации (конструктивная преемственность изделия);
- единство повторяемости и изменяемости технологических методов выполнения, поддержания и восстановления элементов конструкции изделия, учитываемых при его конструировании (технологическая преемственность конструкции изделия).

Преемственность конструкции изделий одинакового или различного назначения (например, гражданского и военного) в условиях конверсии становится одним из главных принципов наиболее целесообразной технологической подготовки производства в условиях рыночной экономики. Использование этого принципа позволяет обеспечить преемственность технологических процессов и средств технологического оснащения (технологической оснастки и технологического оборудования), максимально использовать все достижения, которые созданы ранее при выполнении научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических разработок, освоены в производственных условиях и всесторонне проверены в условиях эксплуатации и ремонта.

В этом смысле преемственность конструкции изделия равнозначна ее технологической рациональности, поскольку характеризует многократную применимость таких решений для воспроизводства продукции различного назначения на имеющейся производственно-технологической базе. То есть создается групповой технологический процесс, значительно расширяющий технологические возможности существующего, обеспечивающий рациональную обработку деталей различного назначения при родственных технологических признаках (характеристиках) с минимальными затратами.

Рассмотренные принципы обеспечения технологичности конструкции наиболее полно могут быть удовлетворены при выполнении основного условия технологического подобия нового проектируемого изделия «*A*» и изделия-аналога «*B*» этого же или любого другого назначения:

$$\{C_a\} \equiv \{C_в\} = \text{idem}, \qquad (1.1)$$

где $\{C_a\}$, $\{C_в\}$ – векторы свойств сравниваемых объектов.

В реальном проектировании и производстве абсолютного тождества свойств объектов наблюдаться не будет и можно лишь говорить о прибли-

женном соответствии выделяемых признаков качества и базовых объектов технологии.

В терминах теории множеств качественная оценка технологической преемственности изделия может быть дана с использованием критерия мощности пересечения:

$$\left|C_{OT}\right| = \bigcap_{i=1}^{n} C_{OTi}, \ \ (i = 1,2, ..., n) \to \max . \qquad (1.2)$$

В пересечение двух или более изделий одинакового или различного назначения входят отдельные параметры, которые можно считать эквивалентными по виду и количественному уровню этих свойств.

Количественная оценка технологической преемственности продукции может быть дана путем расчета коэффициента применяемости составных частей.

$$K_{\text{пр}}^{c} = \frac{E_{\text{пр}} + D_{\text{пр1}}}{E + D}, \qquad (1.3)$$

где $E_{\text{пр}} = E_{\text{пр}}^{\text{н}} + E_{\text{пр}}^{\text{П}} + E_{\text{пр}}^{\text{ст}}$ – число сборочных единиц повторного применения; $D = D_{\text{пр}}^{\text{н}} + D_{\text{пр}}^{\text{П}} + D_{\text{пр}}^{\text{ст}}$ – число деталей повторного применения; $E_{\text{пр}}^{\text{н}}, E_{\text{пр}}^{\text{П}}, E_{\text{пр}}^{\text{ст}}$ – число сборочных единиц, изготавливаемых на предприятии, покупных, нестандартизованных и стандартизованных соответственно; $D_{\text{пр}}^{\text{н}}, D_{\text{пр}}^{\text{П}}, D_{\text{пр}}^{\text{ст}}$ – число деталей повторного применения, изготавливаемых на предприятии, покупных, нестандартизованных и стандартизованных соответственно.

Аналогично можно оценить технологическую преемственность детали по отношению числа ее конструктивных элементов повторного применения ($N_{\text{пр}}^{\text{кэ}}$) к общему числу конструктивных элементов в детали ($N^{\text{кэ}}$):

$$K_{\text{пр}}^{D} = N_{\text{пр}}^{\text{кэ}} \big/ N^{\text{кэ}} . \qquad (1.4)$$

За конструктивный элемент принимается элементарная поверхность или пространственный элемент, для формирования которых может потребоваться применение отдельной технологической операции.

Грамотная инженерная постановка задачи оценки технологической преемственности конструкции изделия требует выявления условий технологического подобия объектов производства и на их основе выбора наиболее существенных признаков качеств (свойств) изделий.

Технологическая рациональность конструкции изделия есть совокупность его свойств, выражающих технологичность изделия с точки зрения соответствия принятых конструкционных решений условиям производства и эксплуатации (ГОСТ 14.201-83).

Технологическая рациональность конструкции изделия является характеристикой, изменяющейся во времени соответственно изменяющимся методам и средствам изготовления, технического обслуживания и ремонта вследствие непрерывного совершенствования технологии.

Методы оценки и показатели технологичности. Оценка технологичности конструкции может быть качественной и количественной. Качественная сравнительная оценка вариантов конструкции изделия допустима на всех стадиях проектирования, когда осуществляется выбор лучшего конструктивного решения и не требуется определять степень различия технологичности сравниваемых вариантов. При качественной оценке большую роль играет опыт конструктора, в частности его технологическая подготовка и интуиция. В роли такого исполнителя должен быть специалист, обладающий высокой эрудицией как в области конструирования, так и в области технологии. Такая специализация работника может быть квалифицирована как «конструктор-технолог», и ее статус должен быть значительно выше, чем у конструкторов и технологов в отдельности.

При качественном анализе технологичности конструкции применяют оценки: плохо, хорошо, допустимо, недопустимо, менее технологично, более технологично. Количественная оценка технологичности выражается определенным показателем или системой показателей, численные значения которых характеризуют степень удовлетворения технологическим требованиям. Количественная оценка технологичности конструкции рациональна только в зависимости от признаков, которые наиболее существенно влияют на технологичность рассматриваемой конструкции, а необходимость ее проведения устанавливается нормативными документами.

Для оценки технологичности конструкции изделия могут быть приняты следующие методы:

1) сравнение показателей технологичности разрабатываемого изделия с соответствующими показателями технологичности базового представителя (метод традиционный и стандартизованный) (ГОСТ 14.201-83);

2) сравнение значений определяющих конструктивно-технологических параметров (КТП) разрабатываемого изделия с допустимыми значениями этих параметров, устанавливаемыми из анализа технологических возможностей предполагаемых для применения в технологическом процессе изготовления этого изделия определенных методов и способов обработки;

3) смешанный (комбинированный) метод, основанный на синтезе первых двух.

При первом методе оценки состав базовых показателей ТКИ, их оптимальные значения и предельные отклонения устанавливаются для типового представителя группы изделий-аналогов, как правило, одинакового назначения и с общими конструктивными признаками, и регламентируются нормативными документами (отраслевыми стандартами). Оптимальные значения

показателей технологичности базовой конструкции изделия указываются в техническом задании на его разработку. Показатели уровня технологичности конструкции изделия определяются как отношение значений показателей ТКИ разрабатываемого изделия к значениям соответствующих показателей базового представителя. Выбор базовых значений ТКИ, относительно которых определяется уровень технологичности и организуется весь процесс отработки конструкции изделия на технологичность, является начальным этапом.

Данные об уровне технологичности конструкции должны использоваться в процессе оптимизации конструктивных решений на стадиях разработки конструкторской документации при принятии решения о запуске в производство изделия и аттестации качества изделий.

В соответствии с государственными стандартами Единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП) выделяют следующие показатели технологичности:

а) по области анализа – технические и технико-экономические;

б) по системе оценки – базовые и разрабатываемой конструкции;

в) по значимости – основные и дополнительные;

г) по количеству характеризуемых признаков – единичные (частные), групповые и комплексные;

д) по способу выражения – абсолютные и относительные.

К основным технико-экономическим показателям ТКИ относят трудоемкость $T_{\text{и}}$ и технологическую себестоимость $C_{\text{ти}}$ изготовления изделия и соответствующие этим показателям уровни технологичности $K_{\text{ут}}$, $K_{\text{ус}}$:

$$K_{\text{ут}} = T_{\text{и}} / T_{\text{б}}; \quad K_{\text{ус}} = C_{\text{ти}} / C_{\text{тб}}, \tag{1.5}$$

где $T_{\text{б}}, C_{\text{тб}}$ – базовые значения показателей трудоемкости и себестоимости изготовления изделия.

Трудоемкость изготовления изделий определяется по сумме затрат на выполнение технологических процессов изготовления изделия. Технологическая себестоимость изготовления изделия равна части себестоимости изделия, определяемая суммой затрат на осуществление технологических процессов изготовления изделия (ГОСТ 14.205-83).

К дополнительным технико-экономическим показателям ТКИ относятся:

- относительная трудоемкость изготовления по видам работ T_i / T_n;
- удельная трудоемкость изготовления по видам работ $T_{\text{и}} / P_{\text{т}}$;
- относительная технологичная себестоимость изготовления по видам работ $C_{\text{т}i} / C_{\text{ти}}$;
- удельная технологическая себестоимость изготовления изделия $C_{\text{ти}} / P_j$, где $T_i, C_{\text{т}i}$ – трудоемкость и технологическая себестоимость по ви-

дам работ; P_j – номинальное назначение основного параметра изделия *j*-го вида (например, масса, объем, мощность и др.).

К недостаткам первого метода оценки ТКИ относятся:

- неидентичность конструкции разрабатываемого изделия и базового представителя при разработке принципиально новых конструкций изделий;
- возможность применения несовершенных технологических процессов для изготовления базовых представителей и неоправданное завышение по этой причине уровня технологичности конструкции разрабатываемого изделия;
- трудность или невозможность расчета основных и дополнительных технико-экономических показателей на ранних стадиях конструирования изделия и технологического проектирования, ввиду отсутствия или недостаточности необходимой информации.

Второй и третий методы оценки ТКИ, предусматривают выбор определенной системы текущих показателей технологичности, числовые значения которых рассчитываются по чертежным размерам изделия на любой стадии конструирования с учетом заданных требований по физико-механическим свойствам материала изделия, в совокупности, влияющим на трудоемкость и себестоимость изготовления и сопоставляются с допустимыми значениями этих показателей, устанавливаемых на основе анализа технологических возможностей планируемых для применения методов и способов обработки.

Применение второго метода оценки ТКИ эффективно при проектировании принципиально новых конструкций изделий с учетом современного или прогнозируемого уровня технологии производства. Номенклатура технических показателей может быть установлена методом анализа основных затрат на изготовление изделия в структуре технологической себестоимости.

На этом основании выделены следующие группы единичных (частных) технических показателей ТКИ [2]:

1 – стоимость и расход основных материалов $(Ц_{\text{м}}, M_{\text{и}}, \eta)$;

2 – обрабатываемость материалов ($\sigma_{0,2}, \sigma_{\text{в}}, \sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}, n, \varepsilon_{ip}, HV$ и др.);

3 – степень сложности геометрической формы (форма поверхностей, количество сборочных единиц $N_{\text{сби}}$, деталей $N_{\text{д}}$ в изделии, количество конструктивных элементов $N_{\text{э}}$ в детали, относительное количество унифицированных, стандартизованных и повторного применения сборочных единиц $\left(N_{\text{сб}} + N_{\text{сб}}^{\text{сТ}} + N_{\text{сб}}^{\text{пТ}}\right)/N_{\text{сби}}$, деталей $\left(N_{\text{д}}^{\text{у}} + N_{\text{д}}^{\text{сТ}} + N_{\text{д}}^{\text{пТ}}\right)/N_{\text{д}}$, конструктивных элементов в детали $\left(N_{\text{э}}^{\text{у}} + N_{\text{э}}^{\text{сТ}} + N_{\text{э}}^{\text{пТ}}\right)/N_{\text{э}}$, относительное количество совместно обрабатываемых конструктивных элементов $N_{\text{эс}}/N_{\text{э}}$; безразмерные геометрические параметры: относительная высота H/D, относительная тол-

щина стенки S/D, относительная толщина дна $S^{д}/D$, относительный радиус кривизны R/S, угол конусности α, перепад диаметров d^{j}/d^{j+1} и толщин S^{j}/S^{j+1} и др., допускаемые отклонения на размеры конструктивных элементов, допускаемая шероховатость поверхностей;

4 – степень сложности физико-механических свойств (степень упрочнения материала конструктивных элементов z изделия) $\sigma_{в}^{z}/\sigma_{в0}, \sigma_{0,2}^{z}/\sigma_{0,2}$, HV^{z}/HV_0, где $\sigma_{в}^{z}, \sigma_{0,2}^{z}, HV^{z}$ – свойства изделия; $\sigma_{в0}, \sigma_{0,2}, HV_0$ – свойства исходного материала; наличие и вид защитных и специальных покрытий, наносимых на поверхности изделия;

5 – пригодность к сборке деталей и сборочных единиц (виды соединений, абсолютное и относительное количество сопрягаемых поверхностей, относительная прочность мест соединения, например, пулеизвлекающее усилие);

6 – пригодность к механизации и автоматизации (масса изделия $M_{и}$, габаритные размеры H, D, форма изделия, показатели симметрии формы и центра массы, свойства сцепляемости и др.);

7 – контролепригодность (абсолютное количество контролируемых размерных, механических и физических параметров, допустимая погрешность измерений, полнота контроля – отношение количества контролируемых признаков к общему количеству задаваемых чертежей и ТУ признаков изделия, сложность контролируемых признаков и др.);

8 – пригодность к восстановлению (ремонту), утилизации (абсолютное $N_{в}$ и относительное $N_{в}/N_{э}$ количество восстанавливаемых конструктивных элементов, оцениваемая, например, по характеристикам коррозии, дефектности металла и др.).

По отношению единичных показателей технологичности разрабатываемой конструкции и их допустимых значений, устанавливаемых экспериментом и производственным опытом и принимаемых за базовые, рассчитывают уровни технологичности:

$$K_{чj} = П_{тj}/П_{тб}, \qquad (1.6)$$

где $П_{тj}, П_{тб}$ – частные и базовые значения показателей ТКИ.

Комплексные показатели ТКИ $П_{т\Sigma}$, при необходимости по отдельным группам показателей и в целом для характеристики технологичности изделия, можно определить в виде суммы произведений частных показателей $П_{тj}$, выраженных в баллах, и «весовых» коэффициентов q_j, определяющих значимость того или иного показателя в общей оценке ТКИ, т.е.

$$П_{т\Sigma} = \sum_{i=1}^{B} П_{тj} q_j, \tag{1.7}$$

где B – общее число принятых для анализа частных показателей ТКИ.

Сумма всех «весовых» коэффициентов по всем группам принятых показателей должна быть равна единице:

$$\sum_{j=1}^{B} q_j = 1. \tag{1.8}$$

Балльная система оценки (трех-, пятибалльная) обеспечивает возможность сопоставления и суммирования показателей ТКИ, имеющих различную размерность и выраженных в абсолютных и относительных величинах. Произведение $П_{rj} q_j$ определяет так называемый «взвешенный» балл. «Весовые» коэффициенты (индексы значимости) q_j устанавливают методом экспертных оценок, например на основе значимости отдельных затрат в структуре технологической себестоимости изготовления изделия. Общий уровень ТКИ определяется по соотношению

$$K_{у\Sigma} = П_{т\Sigma} / (П_{т\Sigma})б, \tag{1.9}$$

где $(П_{т\Sigma})б$ – базовое значение комплексного показателя, рассчитанного по заданным допустимым значениям частных показателей ТКИ.

Целевая функция управления Y процессом разработки изделия по заданным показателям ТКИ должна обеспечить возможность экстремального управления;

$$\begin{aligned} &Y(П_т, П_{тб}) \to \text{extr} \\ &П_т \in S; \\ &П_т(x) \to \text{extr} \\ &x \in S; \\ &S \begin{cases} q_i(x) = 0, i = 1, I, \\ h_i(x) \geq 0, j = 1, J, \end{cases} \end{aligned} \tag{1.10}$$

где $П_т, П_{тб}$ – значения показателя ТКИ, достигнутого на данном этапе проектирования, и базового соответственно; S – область допустимого изменения показателя ТКИ; $x = (x_1, x_2, ..., x_m)$ – множество конструктивно-технологических параметров разрабатываемого изделия; $q_i(x)$ и $h_j(x)$ – функции ограничений по каждому параметру.

Последовательность и содержание работ по обеспечению технологичности конструкции изделия. Целью этого этапа проектирования по отработке конструкции изделия на технологичность является обеспечение рационального использования трудовых, материальных ресурсов и технологического оборудования.

В соответствии с данными выше определениями понятий технологичности конструкций изделий, технологической рациональности и преемственности конструкций решаются следующие задачи:

- снижение трудоемкости и себестоимости изготовления;
- снижение важнейших составляющих – общей материалоемкости (металлоемкости) и энергетических ресурсов при изготовлении.

Комплекс работ по снижению трудоемкости и себестоимости изготовления патронов и их металлических элементов может включать:

- повышение серийности изделия и его составных частей при изготовлении (обработке, сборке) за счет обеспечения технологического подобия по основным конструктивно-технологическим признакам с изделиями серийного производства, но другого назначения, а также посредством унификации и стандартизации отдельных сборочных единиц и деталей, входящих в состав изделия;
- ограничение номенклатуры составных частей (сборочных единиц и деталей) и применяемых материалов;
- применение в разрабатываемых конструкциях, освоенных в производстве конструктивно-технологических решений, соответствующих современным требованиям;
- применение высокопроизводительных и ресурсосберегающих типовых технологических процессов с использованием прогрессивных форм их организации;
- применение высокопроизводительных стандартных средств технологического оснащения, обеспечивающих оптимальный уровень механизации и автоматизации труда в производстве.

В соответствии со сложившимся в научно-технической литературе и практике проектирования изделий машино- и приборостроения подходом признается целесообразность и необходимость отработки конструкций изделий на технологичность на всех, в том числе ранних, стадиях проектирования.

Она должна включать обеспечение ТКИ при его проектировании, технологический контроль конструкторской документации (КД), подготовку и внесение в нее изменений, обеспечивающих достижение оптимальных значений показателей технологичности.

Исполнителями отработки конструкции патрона на технологичность являются разработчики технологической и конструкторской документации предприятия-изготовителя.

Работы по обеспечению ТКИ начинаются на стадиях разработки технического задания (ТЗ) и технического предложения (ТП). Они продолжаются и углубляются при разработке эскизного проекта (ЭП) и технического проекта (ТП), при подготовке рабочей документации. На стадии разработки технического задания на основании анализа параметров известных аналогов патронов и (или) математического моделирования функциональных свойств впервые разрабатываемого образца уточняются назначение и принципиальная схема, форма изделия, его размерные и безразмерные геометрические параметры, физико-механические характеристики, позволяющие дать по известному технологическому классификатору предварительную оценку ТКИ. На стадии разработки технического предложения анализируют варианты принципиальных схем и компоновок изделия, выявляют сложные по конструкции и изготовлению оригинальные сборочные единицы и детали, возможность заимствования сборочных составных частей и деталей. На стадии разработки эскизного проекта устанавливают номенклатуру и параметры деталей, определяют возможность их унификации, стандартизации и рационального членения или объединения, анализируют условия сборки основных деталей, точность их изготовления, шероховатость поверхностей и др. На стадии разработки технического проекта выполняют работы по обеспечению технологичности основных деталей сложной конструкции. На стадии разработки рабочей документации оценивают технологичность конструкции патрона на соответствие основным технологическим требованиям как с точки зрения изготовления каждого из элементов, так и с точки зрения сборки (монтажа и снаряжения). Оптимальной схемой организации технологической подготовки производства следует считать параллельное выполнение проектных работ по разработке конструкторской и технологической документации, включая отработку конструкции изделия на технологичность, совершенствование технологических методов изготовления, совершенствование средств технологического оснащения.

Конструкцию каждого элемента патрона следует отрабатывать на технологичность комплексно, учитывая зависимость от технологичности исходной заготовки, технологических требований, предъявляемых каждым методом и способом обработки, и технологичности сборочной единицы, в которую эта деталь входит как составная часть.

К общим технологическим требованиям, предъявляемым к металлическим элементам патронов, можно отнести следующие.

1. В конструкции детали должно быть наименьшее количество конструктивных элементов при их наиболее простой форме.

2. В конструкции детали должны максимально использоваться унифицированные и стандартизованные конструктивные элементы, а также элементы, технологичные по конструкции, нашедшие применение в аналогичных деталях и показавшие высокие эксплуатационные качества.

3. Допускаемые отклонения на размеры деталей должны соответствовать экономически целесообразной точности применяемых в технологии методов и способов обработки.

4. Металлические материалы, применяемые для изготовления деталей, не должны быть дорогими и дефицитными, должны обладать высокими пластическими свойствами, способностью к деформационному упрочнению, механической обработке, нанесению и удержанию технологических и антикоррозионных покрытий.

5. Конфигурация детали должна обеспечивать наивыгоднейшее использование с учетом заданного объема выпуска и типа производства листовых, прутковых и трубных заготовок при высоком коэффициенте использования металла.

6. Конструкция детали должна обеспечивать возможность применения наиболее прогрессивных методов и способов обработки, технологических процессов, в том числе типовых и стандартизованных.

7. Сопряжения поверхностей деталей различных классов точности и чистоты (шероховатости) должны соответствовать применяемым методам и способам обработки.

8. Конфигурация деталей, соотношение их размеров и физико-механические свойства должны соответствовать технологическим возможностям применяемых для их изготовления методов обработки, в том числе процессов штамповки.

Технологические требования, предъявляемые процессами штамповки, рассмотрены в последующих разделах. Как следует из вышеизложенного, на любой стадии проектирования патрона должна предусматриваться качественная и количественная оценка ТКИ.

Предусматриваются следующие этапы выполнения этой работы:

- определение исходных данных;
- анализ исходных данных; выбор номенклатуры показателей ТКИ;
- расчет базовых значений показателей технологичности и (или) контрольных уровней технологичности;
- расчет показателей технологичности разрабатываемой конструкции детали;
- оценка уровня технологичности конструкции изделия (детали);
- разработка рекомендаций по повышению уровня ТКИ за счет конструкторских решений;
- разработка рекомендаций по повышению уровня ТКИ за счет технологических решений;
- технологический контроль конструкторской документации.

На рис. 1.18 показан типовой алгоритм отработки конструкции изделия на технологичность. Под отработкой конструкции изделия на технологичность понимается часть работ по обеспечению технологичности, направленная на достижение заданного уровня технологичности и выполняемая на всех этапах

разработки изделия (ГОСТ 14.205-83). Определение исходных данных начинают с подборки комплекта конструкторской документации: чертежа детали, технических условий на изготовление. В состав исходных данных может входить техническое задание на проектирование технологического процесса.

В результате анализа исходных данных устанавливают:

- вид и степень новизны изделия (детали);
- форму детали;
- общее количество конструктивных элементов $N_э$;
- количество унифицированных $N_у$, стандартизованных $N_{ст}$ и повторного применения $N_{пт}$ конструктивных элементов детали;
- допускаемые отклонения на размеры и форму детали и ее конструктивных элементов;
- требования по шероховатости поверхностей;

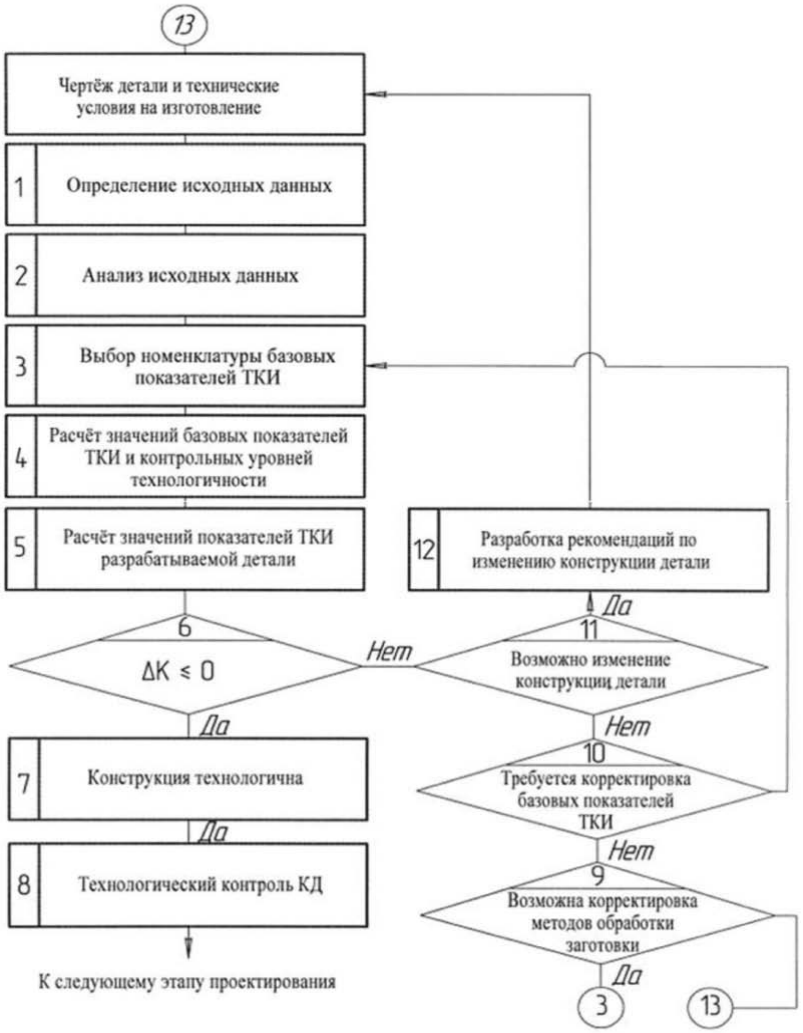


Рис. 1.18. Алгоритм отработки конструкции изготавливаемого изделия на технологичность

- физико-механические свойства (плотность, вид структуры металла, прочность, пластичность и др.) материала в исходном, термически обработанном состоянии и готовой детали в заданных контрольных сечениях и зонах;
- требования по устойчивости против коррозии, коррозионного растрескивания, старения и др.;
- эксплуатационные требования (боевые, баллистические и др.);
- объем выпуска и тип производства;
- возможные методы, способы обработки и виды технологических процессов изготовления детали.

При анализе также могут быть установлены известные аналоги детали, конструкторские и технологические решения, а также даны оценки материальных, трудовых и временных затрат на технологическую подготовку серийного производства детали. Анализ исходных данных включает подготовку ведомостей структурного состава изделия (детали), определение методов обработки, вида технологических операций и способов их выполнения.

При структурном анализе детали выделяют конструктивные элементы (в виде элементарных объемов и поверхностей), требующие для формообразования каждого из них применения отдельных технологических операций, специальных рабочего инструмента и технологической оснастки. Определяют общее количество конструктивных элементов $N_э$, их форму, количество унифицированных $N_у$, стандартизованных $N_{ст}$ и повторного применения $N_{пт}$ конструктивных элементов детали и с применением известных классификаторов процессов обработки устанавливают возможные методы обработки, виды технологических операций и способы их выполнения, которые применяются для изготовления подобных конструктивных элементов и деталей-аналогов в целом для формообразования и формирования физико-механических свойств. Если вид технологического процесса и методы обработки определены техническим заданием и постановкой задачи проектирования технологического процесса, то ведомость состава методов обработки заполняется по ТЗ.

Номенклатура показателей ТКИ устанавливается в зависимости от вида детали, объема выпуска и типа производства, стадии проектирования изделия и технологического процесса его изготовления, содержания исходной информации, указаний ТЗ и руководителя проекта.

На начальных стадиях проектирования, при отсутствии исходных данных для расчета основных и дополнительных технико-экономических показателей, для анализа используют рассмотренную выше систему технических показателей. При этом обязательным для всех случаев является учет групп показателей, характеризующих обрабатываемость материала, сложность геометрической формы деталей, физико-механические свойства материала детали.

Для условий серийного и массового производства обязателен учет показателей, характеризующих стоимость и расход материала, для условий автоматизированного производства – показателей пригодности конструкции детали к механизации и автоматизации. При жестких требованиях к размерам и физико-механическим свойствам для условий серийного и массового производства важное значение приобретает оценка контролепригодности деталей. Недостаточная пригодность изделий для контроля и испытаний существенно затрудняет создание эффективной управляемой технологии и повышает затраты различного рода ресурсов. Для взаимосвязанных деталей необходима оценка пригодности к сборке. Контрольные уровни технологичности могут устанавливаться методами экспертной оценки и расчетно-аналитическим.

Метод экспертной оценки целесообразно применять для выбора контрольных уровней по таким показателям, как масса детали, цена материала, коэффициент использования металла, количество конструктивных элементов, форма детали, допускаемые отклонения на форму и размеры детали, шероховатость поверхности и некоторым другим.

Расчетно-аналитический метод основан на определении критических значений параметров детали из условий ограничения деформации при штамповке, например, условий потери устойчивости и разрушения деформируемой заготовки в опасной зоне и рабочего инструмента.

Расчет параметров ТКИ (рис. 1.18, блок *5*) производится на основе принятой на предыдущем этапе (рис. 1.18, блок *3*) системы базовых значений частных показателей ТКИ и исходных данных (рис. 1.18, блоки *1,2*). Относительные показатели ТКИ вычисляются по значениям принятых абсолютных показателей. Результаты расчета заносятся в карты ТКИ. Результатом количественной оценки ТКИ является формирование целевой функции (рис. 1.18, блок *6*) и алгоритма обеспечения ТКИ, пригодных для принятия решений по совершенствованию конструкции изделия. Применяются методы абсолютной, относительной и разностной оценки ТКИ, выполняемой по вычислению следующих показателей:

а) абсолютных частных $П_{тj}$ и групповых $П_{т\Sigma}$;

б) сравнительных уровней ТКИ

$$K_{чj} = П_{тj} / П_{т\delta}, \quad K_{у\Sigma} = П_{т\Sigma} / П_{тб};$$

в) разностных показателей

$$\Delta K^{I}_{чj} = П_{тj} - П_{т\delta}, \quad \Delta K^{II}_{чj} = 1 - K_{чj},$$

$$\Delta K^{I}_{\Sigma} = П_{т\Sigma} - (П_{т\Sigma})\delta, \quad \Delta K^{II}_{\Sigma} = 1 - K_{у\Sigma}.$$

Целевая функция обеспечения ТКИ для рассматриваемых случаев соответственно будет иметь вид:

$$Z_a : П_{тj} \to П_{т\delta}, \quad Z_a : П_{\Sigma} \to (П_{т\Sigma})\delta,$$

$$Z_б : K_{чj} \to \max, \quad Z_б : K_{у\Sigma} \to \max,$$

$$Z^{I}_{в} : \Delta K^{I}_{чj} \to \min, \quad Z^{II}_{в} : \Delta K^{II}_{чj} \to \min,$$

$$Z^{I}_{в} : \Delta K^{I}_{\Sigma} \to \min, \quad Z^{II}_{в} : \Delta K^{II}_{\Sigma} \to \min.$$

На рис. 1.18 для обеспечения ТКИ применена разностная целевая функция. Отработка конструкции изделия на технологичность производится с учетом требований, сформулированных в ТЗ и ТУ, и возможностей улучшения параметров детали на основе комплексного использования конструкторских и технологических решений.

Для оценки технологичности конструкции заготовок получаемых на штамповочных операциях целесообразно определять частные показатели (табл. 1.12).

Таблица 1.12

Выбор номенклатуры частных показателей технологичности конструкции штампуемых заготовок и деталей (ТКИ)

Номер группы показателей ТКИ	Наименование группы показателей ТКИ	Вид показателя ТКИ	Вид процесса штамповки					
			Вырубка, пробивка, отрезка	Вытяжка без утонения	Вытяжка с утонением	Обжим	Выдавливание	Штамповка дна
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Расход материала	1.1. Масса детали $M_д$	+	-	-	-	-	-
		1.2. Цена материала $Ц_м$	+	-	-	-	-	-
		1.3. Коэффициент использования материал η	+	+	+	+	+	+
2	Штампуемость материала	2.1. Сопротивления материала деформированию:						
		– предел текучести $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление $\sigma_в$	-	(+)	(+)	(+)	+	+
		– сопротивление срезу $\sigma_{ср}$	+	-	-	-	-	-
		2.2. Способность к деформационному упрочнению:						
		– показатель n	-	+	+	+	-	-
		$-\sigma_{0,2}/\sigma_в$, $\sigma_{0,2}/\sigma_{ср}$	-	+	+	-	-	-
		2.3. Предельная устойчивая (равномерная) деформация ε_{iy}	-	+	+	+	-	-
		2.4. Предельная до разрушения пластичность $\varepsilon_{ip}, \psi, \delta$	+	-	+	-	+	+
3	Сложность геометрической формы	1.1. Общая форма детали	+	+	+	+	+	+
		1.2. Общее количество конструктивных элементов детали	+	+	+	+	+	+
		1.3. Относительное количество унифицированных, стандартизованных и повторного применения конструктивных элементов детали $\left(N_у + N_{ст} + N_{пт}\right)/N_э$	+	+	+	+	+	+
		3.4. Габаритные размеры детали H, D	+	+	+	+	+	+
		3.5. Относительная высота детали H/d	+	+	+	+	+	+

Окончание табл. 1.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	Сложность геометрической формы	3.6. Относительная толщина стенки S/d	+	+	+	+	+	+
		3.7. Относительная толщина дна $S_{дн}/D$, $S_{п}/d_{п}$	-	-	-	-	+	+
		3.8. Относительный диаметр фланца $D_{ф}/D$	-	+	+	-	-	+
		3.9. Относительный радиус сопряжения поверхностей $r_{с}/S$, $r_{с}/D$	-	+	+	+	+	+
		3.10. Относительная глубина полости h/d	-	-	-	-	+	+
		3.11. Перепад диаметров d_{min}/d_{max}	-	+	+	-	+	-
		3.12. Перепад толщин дна и стенки $S_{дн}/S$	-	+	+	-	+	+
		3.13. Односторонний угол конусности конических поверхностей α, β, γ	-	+	+	+	+	+
		3.14. Относительный радиус кривизны $R_{р}/R_0$	-	+	+	+	+	+
		3.15. Допускаемые отклонения на поперечные размеры δ_d	+	+	+	+	+	+
		3.16. Допускаемые отклонения на разнотолщинность δ_S	-	+	+	+	+	+
		3.17. Допускаемые отклонения на разностенность $\delta_{р}$	-	-	+	+	+	-
		3.18. Допускаемые отклонения на разновысотность δ_H	-	+	+	+	+	-
		3.19. Шероховатость поверхностей R_a, R_z	+	+	+	+	+	+
4	Сложность физико-механических свойств	4.1. Вид макроструктуры	+	-	+	-	+	+
		4.2. Вид микроструктуры, величина зерна	-	(+)	+	(+)	+	+
		4.3. Герметичность. Величина разуплотнения $\Delta\rho/\rho_0$,%	-	+	+	+	+	+
		4.4. Прочность материала детали:						

		$-\sigma_{0,2}, \sigma_s, HV, HB$ $-\sigma_s/\sigma_{ss}, HV/HV_0, HB/HB_0$	- -	+ +	+ +	+ +	+ +	+ +

Некоторые рекомендуемые методы повышения ТКИ приведены в табл. 1.13.

Таблица 1.13

Методы и приемы, используемые при отработке конструкции изделия на технологичность

Метод (прием)	Характеристика метода	Рекомендации по применению
1	2	3
1. Обеспечение технологической рациональности конструкции изделия		
1.1. Оптимизационный метод выбора конструктивных элементов детали и материалов	Выбор наилучших вариантов конструктивных элементов детали по форме, соотношению размеров с учетом критических значений этих параметров и допустимых норм (контрольных уровней технологичности) для принятых методов обработки. Выбор наилучших вариантов материала для изготовления деталей, характеризующегося высокой штампуемостью и обеспечивающего получение заданных физико-механических свойств детали. Выбор метода оптимизации зависит от вида целевой функции.	Применяется для выбора формы и расположения поверхностей конструктивных элементов, физико-механических свойств, вида заготовок и методов изготовления.
1.2. Размерный анализ	Совокупность приемов расчленения объекта на элементарные поверхности и связи между ними	Применение целесообразно при простановке размеров и их предельных отклонений
1.3. Функционально-стоимост-ной анализ	Минимизация затрат обеспечения основных функций изделия	Применим независимо от типа производства на ранних стадиях проектирования
1.4. Экономико-математическое моделирование	Описание объектов посредством экономических моделей с применением математических средств	Применяется при установлении взаимосвязей основных функциональных, конструктивных и технологических характеристик изделия с затратами ресурсов при изготовлении
2. Обеспечение конструктивной преемственности изделия		
2.1. Типизация конструкции изделия	Создание типового образа изделия для множества его конструктивных исполнений	Наиболее эффективен при многократной повторяемости конструктивных схем
2.2. Унификация конструктивных элементов и материалов	Сокращение разнообразия конструктивных элементов деталей, применение унифицированных элементов и материалов	Применяется на всех стадиях проектирования изделия и технологической подготовки производства

2.3. Заимствование	Выбор конструктивных элементов и материалов из числа существующих	Целесообразен при наличии освоенного производства деталей-аналогов

Окончание табл. 1.13

1	2	3
3. Обеспечение технологической преемственности конструкции изделия		
3.1. Типизация технологических процессов производства	Систематизация, анализ и синтез возможных технологических решений с целью разработки технологических процессов, оптимальных для данных условий производства	Применяется при любом типе производства
3.2. Унификация технологических операций	Сокращение разнообразия операций, способов их выполнения и режимов обработки	Применяется в целях повышения загрузки средств технологического оснащения
3.3. Стандартизация средств технологического оснащения	Совокупность приемов унификации, агрегатирования и взаимозаменяемости средств технологического оснащения	Наиболее эффективен в единичном и мелкосерийном производстве
4. Разработка новых технологических решений		
Разработка принципиально новой технологии	Применение принципиально новых прогрессивных методов обработки, технологических схем, новых материалов	Создание перспективных образцов изделий и новых производств

1.8. Классификация металлических элементов патронов по конструктивно-технологическим признакам

Выбор конструкции, прежде всего формы изделия, узла, детали, определяется многими факторами: назначением, условиями функционирования, условиями изготовления и др.

На этом основании определилась форма патронов к ствольному стрелковому оружию и их металлических элементов в виде полых тел вращения (гильз, пульных оболочек, пиростаканов и др.) и сплошных сердечников.

Установим следующие основные принципы технологической классификации оболочек.

1. Иерархическая структура классификации деталей строится методом системного анализа областей возможных значений определяющих конструктивно-технологических параметров базовой конфигурации детали.

2. Выбор состава классификационных признаков производится на основе анализа условий технологического подобия процессов изготовления деталей.

3. Интервалы числовых значений конструктивно-технологических параметров деталей в пределах классификационных группировок определяются

из анализа технологических возможностей процессов изготовления элементов.

4. Предлагаемая классификация деталей типа тел вращения имеет общий характер и не зависит от их назначения.

Технологически подобные детали независимо от их функционального назначения характеризуются одинаковой технологичностью. Понятие технологичности выражает системный характер связей технических понятий трех классов: объект технологии или изготавливаемое изделие, способ изготовления, определенная совокупность способов изготовления – технологический процесс.

При системном подходе укрупненная модель технологического процесса изготовления детали может быть представлена в виде следующего соотношения:

$$ТП^{\kappa} = \left[\left\{Cn^{\kappa}\right\},\ \left\{S^{\kappa}\right\},\ \left\{Z_1^{\kappa}\right\},\ \left\{Z_2^{\kappa}\right\},\ ...,\ \left\{Z_m^{\kappa}\right\}\right], \qquad (1.11)$$

где $\left\{Cn^{\kappa}\right\}$ – вектор свойств детали; $\left\{S^{\kappa}\right\}$ – структура технологического процесса; $\left\{Z_1^{\kappa}\right\}$, $\left\{Z_2^{\kappa}\right\}$, ..., $\left\{Z_m^{\kappa}\right\}$ – свойства технологического процесса; $\kappa = 1,\ 2,\ ...,\ I$ – индекс, характеризующий количество принятых уровней членения технологического процесса.

Очевидно, что при одинаковых конструктивно-технологических свойствах изготавливаемых деталей одинакового или различного назначения, характеризуемых векторами, определяющими пространство свойств указанных объектов, выполняется условие их тождества:

$$C_{ni}^{\kappa} \equiv C_{nj}^{\kappa} \qquad (1.12)$$

и, как следствие,

$$\left\{S_i^{\kappa}\right\} \equiv \left\{S_j^{\kappa}\right\};\quad \left\{Z_{1i}^{\kappa}\right\} \equiv \left\{Z_{1j}^{\kappa}\right\};\quad \left\{Z_{2i}^{\kappa}\right\} \equiv \left\{Z_{2j}^{\kappa}\right\},...,\quad \left\{Z_{mi}^{\kappa}\right\} \equiv \left\{Z_{mj}^{\kappa}\right\}, \qquad (1.13)$$

где индексы i, j соответственно обозначают базовый и присоединяемый варианты конструкции деталей различного назначения и технологических процессов их изготовления.

Условия (1.12) и (1.13) суть в обобщенном виде условия технологического подобия изделий. Из этих условий следует, что при технологическом подобии изделий различного назначения влияние их эксплуатационных свойств на построение технологических процессов и производство будет несущественным.

Условия технологического подобия устанавливаются при рассмотрении условий подобия физических явлений, протекающих в системах, состоящих из взаимодействующих твердых тел, обрабатываемых каким-либо способом, и определяются известными из механики сплошных сред теоремами подобия.

Согласно одной из теорем две сравниваемые системы (два сравниваемых процесса обработки), геометрически подобные в начальный момент времени, будут физически детально подобны во все соответствующие промежутки времени, если все безразмерные параметры (безразмерные комбинации), именуемые критериями подобия и образуемые из заданных по условиям процесса размерных величин, будут одинаковы для сравниваемых систем.

Из этой теоремы вытекают два следствия.

Следствие первое. Подобные физические явления (в нашем случае технологические процессы изготовления деталей) протекают всегда только в геометрически подобных системах.

Следствие второе. Критерии подобия формируются из анализа дифференциальных уравнений математической физики, устанавливающих взаимосвязь пространственных изменений во всех физических переменных, характерных для рассматриваемого явления, например, дифференциальных уравнений, уравнений пластичности и др., описывающих процессы пластической деформации, применяемых для формообразования деталей.

На основании применения рассмотренных теорем авторами сформулированы следующие постулируемые положения, определяющие основные принципы построения технологического классификатора изделий любого предметного назначения.

1. Конструкция детали – объекта технологии – представляет собой конечное состояние обрабатываемой заготовки, соответствующее завершению элементарного или комплексного технологического процесса как определенного физического явления, протекающего при взаимодействии заготовки и средств технологического оснащения.

2. В качестве основных классификационных признаков, определяющих подобие объектов технологии, следует принимать безразмерные параметры (геометрические и физические критерии подобия), определяющие подобие процессов, применимых для изготовления деталей.

3. Вид и количество классификационных признаков, определяющих технологическое подобие деталей, устанавливается из анализа критериальных уравнений для основных методов и способов обработки, применяемых для изготовления изделия.

Принимая во внимание, что основным прогрессивным методом формообразования металлических элементов патронов является обработка давлением (холодная штамповка), целесообразно выявить классификационные признаки на основе преимущественного анализа условий пластического подобия, рассматриваемых в теории обработки металлов давлением. Для нашего случая система определяющих уравнений включает в себя известную систему из дифференциальных уравнений, граничных условий, геометрических и физических уравнений с учетом условия пластичности, а также условий ограничения деформации по критерию устойчивости и прочности деформируемых (штампуемых) заготовок.

После приведения системы перечисленных уравнений к безразмерному виду путем введения соответствующих масштабных соотношений и исключения дублирующих уравнений и безразмерных параметров получено, так называемое критериальное уравнение следующего вида:

$$\Phi\left[\begin{array}{l}\overbrace{\frac{x}{l},\frac{y}{l},\frac{z}{l}}^{1};\overbrace{n,m,Bt,\varepsilon_{i\text{p},\ldots},E_{\sigma},\frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_{i0}},}^{2}\\ \overbrace{t_p,b_m,\nu_{ш}}^{3},\overbrace{f,\nu\eta}^{4},\overbrace{\varepsilon_{ij},\sigma_{ij},\tau_{ij},\frac{P_k}{\sigma_{i0}},K}^{5}\end{array}\right]=0, \qquad (1.14)$$

где x, y, z – координаты очага пластической деформации; l – масштаб подобия; σ_{i0} – константа материала, соответствующая пределу текучести в исходном состоянии; n, m, B – константы материала, учитывающие влияние степени, скорости деформации и температуры процесса на свойства исходного металла; $\varepsilon_{i\text{p}}$ – предельная до разрушения интенсивность деформации при испытании образцов материала на растяжение; $t_p, b_m, \nu_{\text{ш}}$ – безразмерные характеристики микрорельефа поверхностного слоя детали; f – коэффициент трения; η – динамическая вязкость смазочной среды; v – скорость деформирования.

В уравнении (1.14) группа *1* параметров характеризует геометрию очага деформации, группа *2* – физико-механические свойства материала детали, группа *3* – геометрию микрорельефа поверхности детали, группа *4* – условия пластической деформации; группа *5* – деформационные и силовые параметры процесса.

Технологический классификатор. Принимая во внимание сформулированные выше постулаты и учитывая, что металлические детали относятся к классу тел вращения, выделим на основе критериального уравнения (1.14) основные классификационные признаки формуемых деталей, характеризующие их технологическое подобие.

Признаки и условия геометрического подобия очага пластической деформации, в том числе очага устойчивости, разрушения будут иметь следующий вид:

$$x/l = \text{idem}; \quad y/l = \text{idem}; \quad z/l = \text{idem}. \qquad (1.15)$$

Из этих условий следует, что критерии геометрического подобия, выраженные через безразмерные отношения координат сходственных точек, будут также равны, т.е.

$$x/y = \text{idem}; \quad x/z = \text{idem}; \quad y/z = \text{idem}. \qquad (1.16)$$

Описание геометрического образа формуемой детали координатами экстремальных вершин контура позволяет установить их соответствие с определяющими форму детали габаритными размерами, а следовательно, выразить условия геометрического подобия через эти размерные параметры.

На основании анализа технической целесообразности в качестве базовой конфигурации металлических элементов патронов при построении классификации принимаем деталь типа тела вращения, образованную сочетанием конструктивных элементов верхнего уровня: стенки и дна.

Стенкой называют конструктивный элемент детали, формирующий полость. Членение детали на втором, среднем, уровне предусматривает выделение конструктивных элементов второго порядка, т.е. для стенки и дна в отдельности.

Первый, нижний, уровень членения предполагает выделение конструктивных элементов детали наименьшей значимости, элементарных поверхностей и их наиболее простых совокупностей, но требующих для их формирования, как правило, отдельных технологических операций. Представляется, что предложенная типовая структура объекта технологии и способ членения в наибольшей степени удовлетворяют конечной цели классификации объектов для условий крупносерийного и массового производства. В соответствии с принятым способом членения базовой конструкции детали классификационные признаки также должны иметь иерархическую структуру.

На верхнем уровне классификации выделяемые признаки должны характеризовать общую форму детали (плоскостность, компактность, удлиненность) и наличие конструктивных элементов верхнего уровня: стенки, полости, дна. В качестве классификационных признаков на этом уровне принимаем безразмерные параметры, определяемые в соответствии с условиями подобия по отношению конечных габаритных размеров деталей:

$H_D = H/D$ – относительная высота;

$S_D = S/D$ – относительная толщина стенки; (1.17)

$S_D^D = S^D/D$ – относительная толщина дна или $S_{DH}^D = S^D/H$,

где D, S, S^D – наружный диаметр, толщины стенки и дна; так называемые симплексы S_D и S_{DH} являются дублирующими.

Для невысоких конических и с криволинейной образующей деталей относительная высота определяется по отношению полной высоты к среднему по высоте диаметру, т.е.

$$H_D = H/D_{\text{ср}}, \tag{1.18}$$

где $D_{\text{ср}} = (D_{\max} + D_{\min})/2$; $D_{\max}, D_{\min}$ – диаметры основания и вершины соответственно.

Для деталей ступенчатых

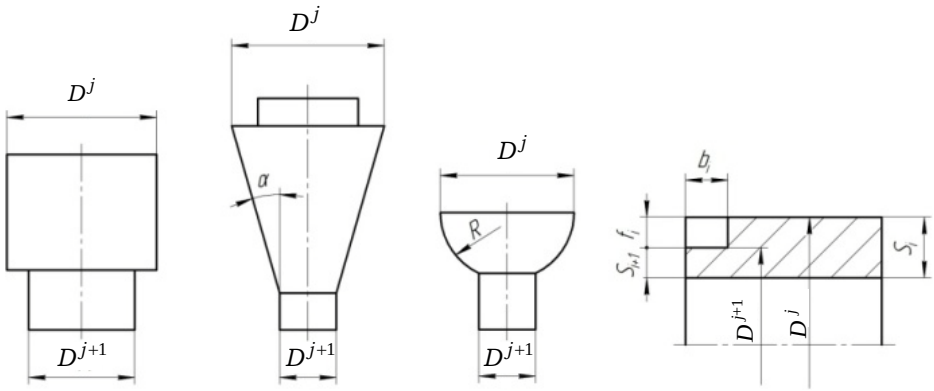
$$H_D = \sum_{j=1}^{n_{ст}} h^j / D^j, \qquad (1.19)$$

где h^j, D^j – высота и наружный диаметр j-й ступени; $n_{ст}$ – число ступеней.

При наличии конических и ступеней с криволинейной образующей их относительная высота определяется по соотношению (1.19). Под ступенью следует понимать цилиндрический (рис. 1.19,*а*), конический (рис. 1.19,*б*), полусферический (рис. 1.19,*в*) и другого вида пространственный конструктивный элемент, ограниченный перепадом диаметров $D^j, D^{j+1}\left(D^j / D^{j+1} \neq 1\right)$, кроме случаев, когда на поверхности имеется канавка (рис. 1.19,*г*) со следующими соотношениями размеров:

$$0{,}5 < f_i / D^j < 0{,}1; \quad f_i / S_i < 0; \quad b_i / f_i < 2{,}0. \qquad (1.20)$$

При $D^j / D^{j+1} = 1$ (фаски, канавки, резьбы во внимание не принимаются) деталь бесступенчатая.



а *б* *в* *г*

Рис. 1.19. Виды ступенчатых поверхностей: *а*, *г* – цилиндрических; *б* – конических; *в* – с криволинейной образующей

Для высоких конических и деталей с криволинейной образующей относительная высота определяется по соотношению

$$H_D = \sum_{j=1}^{n} \frac{h^j}{D^j} \frac{1}{\left(1 - 2\frac{h^j}{D^j} \operatorname{tg}\alpha^j\right)}, \qquad (1.21)$$

где h^j, D^j – высота и диаметр выделенной условной ступени; n – число условных ступеней; α^j – угол наклона образующей детали к условной ступени.

При этом

$$H_{D\min} < H_D < H_{D\max},$$
$$S_{D\min} < S_D < 0{,}4, \qquad (1.22)$$
$$0 < S_{DH} < 1,$$

где $H_{D\min}, H_{D\max}, S_{D\min}$ – предельные значения безразмерных геометрических параметров для полых деталей с выраженной стенкой.

В таблице 1.14 дана технологическая классификация металлических элементов патронов, изготавливаемых способами холодной штамповки по признакам относительной высоты H_D, относительной толщины стенки S_D и относительной толщины дна S_{DH}. Интервалы числовых значений признаков установлены из анализа технологических возможностей процессов штамповки и результатов статистического исследования выборочных статистических совокупностей заготовок и деталей, изготавливаемых в патронной промышленности. Как следует из таблицы, с увеличением кода классификационной группировки по каждому из признаков $H_{D,}S_D, S_{DH}^D$ технологичность конструкции детали ухудшается, так как увеличивается трудоемкость и затраты всех видов ресурсов.

Таблица 1.14

Технологическая классификация металлических элементов патронов по безразмерным параметрам верхнего уровня

Признак классификации	Наименование классификационной группировки	Числовые значения признака	Код классификационной группировки
Относительная высота *H*/*D*	Плоские	До 0,03	0
		0,03 … 0,15	1
	Низкие	0,16 … 0,25	2
		0,26 … 0,49	3
		0,50 … 0,80	4
	Компактные	0,81 … 1,25	5
		1,26 … 2, 00	6
	Высокие	2,01 … 3,00	7
		3,01 … 4,50	8
	Удлиненные	Более 4,50	9
Относительная толщина стенки *S*/*D*	Сплошные	0,50 … 0,40	0
	Полые толстостенные	0,39 … 0,20	1
	Полые средней толщины	0,19 … 0,10	2
		0,09 … 0,02	3
	Полые тонкостенные	Менее 0,02	4
	Резервные группировки		5 …9
Относительная толщина дна S^D/H	Сплошные	1,00 … 0,71	0
	Полые с толстым дном	0,70 … 0,61	1
		0,60 … 0,50	2
		0,49 … 0,41	3

		0,40 … 0,34	4
	Полые с дном средней толщины	0,33 … 0,16	5
		0,15 … 0,09	6
	Полые с тонким дном	0,08 … 0,01	7
		До 0,01	8
	Полые без дна	0	9

Условия геометрического подобия и классификационные признаки среднего уровня деталей устанавливаются из анализа уровней поверхностей их образующих, для стенки и дна в отдельности. Принимаем в качестве основного показателя геометрической формы угловой коэффициент касательной к кривой и выражаем его в соответствии с теоремой Лангранжа (о среднем значении) через конечные размеры детали, т.е.

$$K^{j,j+1} = \mathrm{tg}\alpha^{j,j-1} = f^{1}(C) = \frac{f\left(x^{j}\right) - f\left(x^{j-1}\right)}{x^{j} - x^{j-1}}, \qquad (1.23)$$

где $x^{j-1} < C < x^{j}$; x^{j-1}, x^{j} – координаты выделенного отрезка образующей.

Откуда

$$\alpha^{j,j-1} = \mathrm{arc\ tg}\frac{f\left(x^{j}\right) - f\left(x^{j-1}\right)}{x^{j} - x^{j-1}} = \mathrm{arc\ tg}\frac{h^{j} - h^{j-1}}{x^{j} - x^{j-1}}, \qquad (1.24)$$

где h^{j}, h^{j-1} – расстояния расчетных j-го, $(j-1)$-го сечений от измерительной (установочной) базы.

Следующей характеристикой формы образующей может служить относительный радиус кривизны

$$\overline{R}_{D}^{j,j-1} = \frac{R^{j,j-1}}{D} = \frac{\left[1 + \left(K^{j,j-1}\right)^{2}\right]^{3/2}}{D \cdot dK^{j,j-1}/dx^{\alpha}}. \qquad (1.25)$$

В частном случае $D = 2x^{j}$.

Для цилиндрических поверхностей

$$K^{j,j-1} = 0; \quad \alpha^{j,j-1} = 0; \quad r_{D}^{j,j-1} = \infty. \qquad (1.26)$$

Для конических поверхностей

$$K^{j,j-1} \neq f(x) = \mathrm{const}; \quad \alpha^{j,j-1} \neq 0; \quad r_{D}^{j,j-1} = \infty.$$

Для поверхностей с криволинейной образующей

$$0 < R^{j,j-1} < \infty; \quad K^{j,j-1} = f(x) = \text{var}.$$

В табл. 1.15 дана технологическая классификация деталей по выделенным признакам среднего уровня.

Таблица 1.15

Технологическая классификация элементов патронов по безразмерным геометрическим параметрам среднего уровня

Наименование классификационной группировки		Признаки классификации		Код классификационной группировки
		α, град.	$\overline{R_D}$	
Наружная поверхность				
Сплошные, без стенки		--	--	0
Полые с прямолинейной образующей, цилиндрические		0	∞	1
Полые с прямолинейной образующей, конические		До 10	∞	2
		11 … 45	∞	3
		Более 45	∞	4
Полые с криволинейной образующей		$\alpha \neq 0$	До 2,5	5
		$\alpha \neq 0$	2,5 … 7,5	6
		$\alpha \neq 0$	Более 7,5	7
Полые с комбинированной образующей, ступенчатые		var	var	8,9
Внутренняя поверхность				
Сплошные, без стенки		--	--	0
Полые, с постоянной по высоте толщиной стенки		Образующая эквидистантна образующей наружной поверхности		1
Полые с переменной по высоте толщиной стенки	С конической полостью и прямолинейной образующей	До 5	∞	2
		5 … 45	∞	3
		Более 45	∞	4
	С куполообразной полостью и криволинейной образующей	$\alpha \neq 0$	До 2,5	5
		$\alpha \neq 0$	2,5 … 7,5	6
		$\alpha \neq 0$	Более 7,5	7
	Ступенчатые	var	var	8

По тем же признакам, что приведены в табл. 1.15, описывается геометрия дна детали соответственно по наружной и внутренней поверхностям с применением тех же качественных и количественных интервальных значений признаков по группам. Соответственно при описании деталей по признакам

наружной поверхности дна выделим следующие группы деталей: без дна (0), с плоским дном (1), с коническим дном (2)…(4), с выпукло-вогнутым дном (5)…(7), со ступенчатым дном (8). По признакам внутренней поверхности дна выделяем детали: без дна (0), с постоянной по радиусу толщиной дна (2), с плоской конической, криволинейной внутренней поверхностью и переменной толщиной дна (2)…(8), со ступенчатой внутренней поверхностью (9). В скобках дан цифровой код выделенных групп деталей. В качестве классификационных признаков первого, нижнего, уровня принимаем безразмерные параметры конструктивных элементов, характерных для стенки и дна в отдельности (фланцев, канавок, выступов, полостей, рельефа и т.п.):

$$h_i/D;\quad D_i/D;\quad b_i/D;\quad b_i/D_i;\quad f_i/b_i;\quad f_i/D_i,$$

где h_i/D – относительное расстояние *i*-го конструктивного элемента от базы; D_i – диаметр конструктивного элемента типа фланца и полости (открытой или глухой); b_i – ширина канавки или выступа; f_i – глубина канавки или высота выступа; $i = 1,2,...,n$ – количество конструктивных элементов нижнего уровня.

За рельеф принимается любой формы конструктивный элемент детали со следующими соотношениями его размеров (рис. 1.19,*г*):

$$f_i/D_i \le 0{,}2;\quad f_i/S_i \le 0{,}1;\quad b_i/f_i \le 2. \qquad (1.27)$$

По относительному диаметру фланца детали в зоне дна $D_ф/D$ целесообразно выделить группы деталей:

- без фланца;
- с фланцем выступающим $D_ф/D > 1{,}0$;
- с фланцем невыступающим (при наличии экстракторной канавки) $D_ф/D \le 1{,}0$.

Более детальная классификация может быть выполнена по другим безразмерным геометрическим параметрам нижнего уровня (виду и глубине рельефа на поверхности дна и стенки в отдельности), а также по параметрам шероховатости поверхностей и допускаемым отклонениям на размеры деталей. Важными параметрами при оценке технологичности служат параметры штампуемости и требуемой степени упрочнения материала детали, которые оцениваются по характеристикам пластичности материала в исходном, отожженном состоянии ε_{iy} и ε_{ip}, сопротивлению деформированию $\sigma_{0,2}(\sigma_т)$ и отношению характеристик прочности $\sigma_в/\sigma_{в0}$ и твердости HV/HV_0 детали и материала в отожженном состоянии.

В табл. 1.16 и 1.17 дана классификация металлических элементов патронов по указанным характеристикам.

При условии равенства или близости рассмотренных выше безразмерных геометрических параметров, параметров штампуемости и степени упрочнения изделий, входящих в одинаковые группы по технологической классификации, выполняются условия подобия процессов штамповки по напряженно-деформированному состоянию и энергосиловым параметрам независимо от абсолютных габаритных размеров изделий, т.е.

$$\varepsilon_{ij} = \text{idem}; \quad \sigma_{ij}/\sigma_{i0} = \text{idem}; \quad \sigma_{\kappa}/\sigma_{i0} = \text{idem}; \qquad (1.28\text{а})$$

$$P/D^2\sigma_{i0} = \text{idem}; \quad M/D^3\,\sigma_{i0} = \text{idem}; \quad A/D^3\,\sigma_{i0} = \text{idem}, \qquad (1.28\ \text{б})$$

где P – полное усилие; M – момент действующих сил; A – работа формоизменения.

Таблица 1.16

Технологическая классификация металлических элементов патронов по параметрам штампуемости

Признак классификации	Наименование классификационной группы	Числовые значения признака классификации				Код классификационной группировки
		$\varepsilon_{i\text{y}} = n$	$\varepsilon_{i\text{p}}$	$\sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{0,2}\,(\sigma_{\text{т}})$, МПа	
Характеристики пластичности и упрочняемости материала	Из материалов весьма высокой штампуемости	Более 0,50	Более 2,0	Менее 0,45	--	0
	Из материалов высокой штампуемости	0,49 … 0,25	1,96 … 1,0	0,45 … 0,60	--	1
	Из материалов средней штампуемости	0,24 … 0,15	0,96 … 0,60	0,61 … 0,75	--	2
	Из материалов низкой штампуемости	0,14 … 0,05	0,56 … 0,20	0,75 … 0,85	--	3
	Из материалов весьма низкой штампуемости	Менее 0,05	Менее 0,20	Более 0,85	--	4
Характеристики сопротивления материалов деформированию	С весьма низким сопротивлением деформированию	--	--	--	Менее 15,0	0
	С низким сопротивлением деформированию	--	--	--	15,1 … 50,0	1
		--	--	--	50,1…100,0	2
	Со средним сопротивлением деформированию	--	--	--	100,1…200,0	4
		--	--	--	200,1…300,0	4
		--	--	--	300,1…400,0	5

		--	--	--	400,1…500,0	6
	С высоким сопротивлением деформированию	--	--	--	500,1…600,0	7
		--	--	--	600,1…800,0	8
		--	--	--	Более 800,0	9

Таблица 1.17

Технологическая классификация металлических элементов патронов по требуемой степени упрочнения

Наименование классификационной группы	Числовые значения признака	Код классификационной группы
Без заданных требований по механическим свойствам	–	0
Без упрочнения	1,00	1
С низким упрочнением	1,00…1,50	2
Со средним упрочнением	1,51…2,00	3
С высоким упрочнением	2,01…2,50	4
С весьма высоким упрочнением	Более 2,50	5

В табл. 1.18 дана классификация металлических элементов по размерным параметрам и массе, которые влияют на металлоемкость продукции, технологической оснастки, технологического оборудования, затраты на их эксплуатацию и капитальные вложения.

Степень сложности физико-механических свойств деталей, помимо требуемой степени упрочнения, характеризуется видом наносимого на поверхности антикоррозионных, декоративных и опознавательных покрытий, а затраты на основные материалы – видом этих материалов (табл. 1.19, 120).

Таблица 1.18

Классификация металлических элементов патронов по габаритным размерам и массе

Признаки классификации					
Диаметр *D*, мм			Высота *H*, мм		
Группа	Числовые значения признака	Код группы	Группа	Числовые значения признака	Код группы
Мелкие	До 5	0	Малой высоты	До 10	0
Среднего диаметра	5 … 10	1		10 … 25	1
	10 … 15	2	Средней высоты	25 … 45	2
	15 … 28	3		45 … 75	3
Крупные	Более 28	4	Высокие	75 … 120	4
Резерв	--	5 … 9	Резерв	--	5 – 9
Толщина *S*, мм			Масса, кг		
Группа	Числовые значения признака	Код группы	Группа	Числовые значения признака	Код группы
Малой тол-	До 0,5	0	Малой массы	До 0,006	0

щины	0,5 … 0,8	1	Средней массы	0,006 …0,025	1
	0,8 … 1,6	2		0.025 …0,050	2
Средней толщины	1,6 … 2,5	3	Большой массы	0,05 … 0,100	3
	2,5 … 6,0	4		0,100 … 0,00	4
Большой толщины	6,0 … 10,0	5	Резерв	--	5 … 9
Резерв	--	6 … 9			

Таблица 1.19

Классификация металлических элементов по виду применяемых материалов

Вид материалов	Числовое значение признака	Код классификационной группировки
Низкоуглеродистые, конструкционные качественные стали	Содержание углерода до 0,15%	0
	Содержание углерода до 0,22%	1
Низкоуглеродистые высококачественные стали	Содержание углерода до 0,15%	2
	Содержание углерода до 0,22%	3
Конструкционные качественные средне углеродистые стали	Содержание углерода 0,22…0,65%	4
Высокоуглеродистые инструментальные стали	Содержание углерода более 0,70%	5
Металлокерамические твердые сплавы	На основе карбида вольфрама	6
Биметаллы	Б1, Б3	7
Латуни	Л68, Л70	8
Алюминий и его сплавы	А00, А0, А1, А2, А3, АД, АД1	9

Таблица 1.20

Классификация металлических элементов по виду применяемых покрытий

Наличие и вид покрытия	Код классификационной группировки	Наименование классификационной группировки
Без покрытий	--	0
С металлическим покрытием	Латунирование	1
	Цинкование	2
	Никелирование и др.	3
С неметаллическим покрытием	Пассивирование	4
	Фосфатирование	5
	Лакирование	6

Полимерное	7
Окрашивание	8
Резерв	9

1.9. Обобщенный алгоритм технологического обеспечения качества и надежности патронов

В основу принципов технологического обеспечения конструкции изготавливаемого изделия принимаем (по Г.З. Серебреникову) следующие феноменологические предпосылки.

Состояние изготавливаемого объекта A (объекта технологии и эксплуатации) с определенной совокупностью n свойств описывается в момент времени τ в n-мерном фазовом пространстве точкой $x(\tau)$, так что $x_1(\tau)$, $x_2(\tau)$,…, $x_n(\tau)$ – ее координаты состояния:

$$x(\tau) = (x_1(\tau), x_2(\tau),\ldots, x_n(\tau)). \qquad (1.29)$$

Принимается, что τ имеет дискретные значения: $\tau = 0, 1, \ldots N$. Тогда последовательность значений $x(0)$, $x(1)$, ..., $x(N)$ описывает траекторию объекта A в фазовом пространстве, т.е. изменение его состояния и свойств в процессе обработки и функционирования. Предположим, что в каждый момент времени τ на объект A действует совокупность управляющих параметров $U_1(\tau)$, $U_1(\tau)$,…, $U_r(\tau)$, так что $U(\tau) = (U_1(\tau), U_2(\tau), \ldots, U_r(\tau))$.

Тогда закон движения (изменения состояния) дискретного объекта A под действием управления $U(\tau)$ описывается функцией

$$x(\tau) = x(x_o, U(\tau)), \qquad (1.30)$$

где $x_o = x(\tau = 0)$ – начальное состояние объекта;

$$U(\tau) \in U_\tau (x(\tau - 1); \ \tau = 1, 2, \ldots, N.$$

Из соотношений (1.29) и (1.30) следует, что, выбирая различные начальные состояния объекта (x_o) и законы управления $U(\tau)$, можно получить различные конечные состояния объекта $x(N)$, т.е. различную совокупность и уровень свойств. Выбираем конкретный функционал качества I траектории объекта, который показывает, насколько выгоден выбранный процесс. Пусть I имеет вид

$$I_N(x_o, U(\tau)) = \sum_{\tau=1}^{N} \varphi_\tau (x(\tau - 1), U(\tau)). \qquad (1.31)$$

Задачей оптимального управления является выбор такого закона $U(\tau)$ из области допустимых значений $U(\tau) \in U_\tau (x(\tau\text{-}1)$, при котором в процессе дви-

жения объекта из начального состояния x_0 в конечное x_N функционал качества примет максимальное значение:

$$I_N(x_0, U(\tau)) = \max I_N(x_0, U(\tau)). \qquad (1.32)$$

Таким образом, из соотношений (1.31), (1.32) следует, что конечное значение функционала качества зависит даже при оптимальном управлении $U(\tau)$ как от числа шагов N, так и от начального состояния объекта x_0. В соответствии с принципом Беллмана траектория, оптимальная на всем интервале управления от момента $\tau_{об} = 1$ до N, может быть неоптимальной для случая, когда рассматривается движение на отрезке от $\tau = 1$ до N_1, где $N_1 < N$.

Следовательно, оптимум задачи определится лишь при охвате всей траектории изменения состояния объекта.

Проведем аналогию между описанной выше схемой оптимального управления движением объекта и технологией изготовления, например, металлической детали и последующей ее эксплуатацией, исключающей появление различного рода отказов. После кристаллизации слиток подвергается пластической деформации при горячей, а затем холодной прокатке, далее смягчающей термообработке, механической обработке, штамповке и т.д. по схеме, приведенной на рис. 1.20.

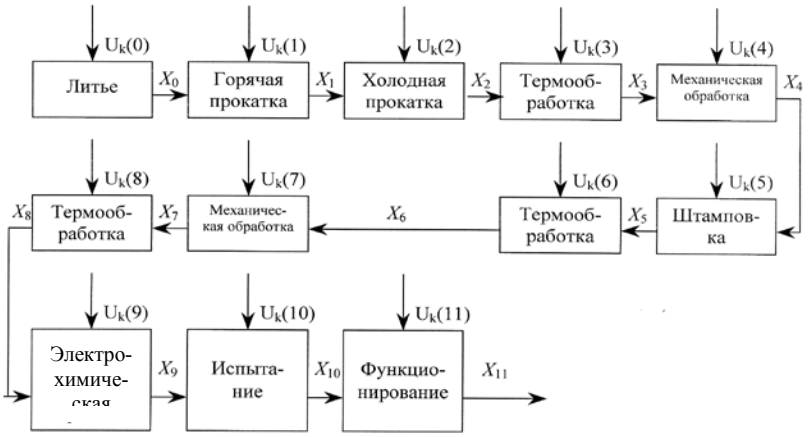


Рис. 1.20. Технологическая схема изменения состояния заготовки в процессе обработки детали, при испытании и функционировании

Согласно выполненному выше анализу необходимо каждый сдвиг параметра τ на единицу принять за переход к новой технологической операции. Например, $\tau = 0$ соответствует операции получения литой заготовки, $\tau = 1$ – горячей прокатке, $\tau = 2$ – холодной прокатке и т.д. Очевидно, на каждой операции имеется своя совокупность параметров воздействия (параметров управления) $U_к(\tau)$, где $к = 1, 2, ... к$. Так, если считать состав сплава заданным,

то в процессе литья можно управлять температурой $U_1(l) - t_л$, скоростью охлаждения как в период кристаллизации $U_2(l) - v_{кр}$, так и после ее завершения $U_3(l) - v_{охл}$. Поэтому здесь под областью управления следует понимать область изменения $t_л$, $v_{кр}$, $v_{охл}$. В процессе пластической деформации при горячей прокатке можно управлять температурой $U_1(2) - t_{пр}$, длительностью нагрева перед пластической деформацией $U_2(2) - \tau_н$, количеством переходов прокатки $U_3(2) - N_{пр}$, распределением степеней деформаций по переходам прокатки $U_4(2) - \varepsilon_{ii}$, скоростью деформации $U_5(2) - \varepsilon_i$ и последеформационного охлаждения $U_6(2) - v_{пр}$. При механической обработке имеется свой комплекс параметров, определяющих качество поверхности, величину остаточных напряжений: это скорость $U_1(5)$ и глубина $U_2(5)$ резания, а также тип охлаждающей жидкости $U_3(5) - C$. Параметрами термообработки являются: температура $U_1(4) - t_{то}$ и длительность $U_2(4) - \tau_{то}$, кратность нагревов и охлаждений $U_3(4) - N_{то}$, характер фазовых переходов (отжиг 1-го или 2-го рода, закалка), скорость охлаждения $U_4(4) - v_4$. Параметрами процесса штамповки являются: количество переходов $U_1(6) \rightarrow n_{шт}$, степень деформации в характерных сечениях заготовки по переходам $U_2(6) \rightarrow \varepsilon_i$, геометрия рабочего инструмента по переходам $U_3(6) \rightarrow h_i$, количество матриц $U_4(6) \rightarrow N_M$, вид смазки $U_5(6) \rightarrow C_{шт}$.

При окончательной термообработке можно указать температуру нагрева под отжиг $U_1(10) - t_3$ длительность отжига $U_2(10) - m_3$, наличие промежуточных отпусков $U_3(10) - P_o$, температуру окончательного отпуска $U_4(10) - t_{от}$.

При испытании такими параметрами могут быть температура $U_1(12) - t_ф$, темп стрельбы $U_2(12) \rightarrow \tau_ц$, величина внутреннего давления $U_4(12) - p$ и др. параметры.

Приведенные примеры характеризуют неполный перечень возможных параметров управления, формирующих конечный функционал качества.

В качестве фазовых координат системы объекта A согласно (1.29) могут быть приняты конструктивно-технологические параметры (КТП) изделия. Очевидно, что отмеченные фазовые координаты будут функциями не только управлений $U_s(\tau)$ на каждом τ-м переходе, но и начальных состояний системы $x(\tau\text{-}1)$.

Математически сказанное формулируется в виде уравнений движения фазовых координат (1.30), в которых $f\tau(x(\tau\text{-}l), U(\tau))$ представляет результат обработки на τ–y-переходе. Конечно, получение точного явного вида функций или операторов $f\tau(x(\tau\text{-}l), U(\tau))$ для большинства комплексных технологических процессов, основанных на реализации разнородных физических явлений, представляется сложной задачей и составляет предмет физического и математического моделирования.

При анализе функционала качества возможен ряд вариантов его описания, определяемых конкретными требованиями к деталям и изделиям в целом. Одним из наиболее типичных является случай, когда задано число операций N и их последовательность (технологический маршрут). Требуется оптими-

зировать расходы на указанных операциях и обеспечить на выходе заданное сочетание конструктивно-технологических параметров, и надежность его функционирования. Математически сказанное записывается в виде

$$I_N(x_o) = \min \sum_{\tau=1}^{N} \varphi_\tau(x(\tau-1), U(\tau)), \tag{1.33}$$

$$x(N)^{U_\tau} \geq [a], \tag{1.34}$$

где $x(N) = \{x_1(N), x_2(N), ..., x_1(N)\}$; $a = \{a_1, a_2, ..., a_1\}$; $\varphi_\tau(x(\tau\text{-}1), U(\tau))$ – расходы на выполнение совокупностей операций на τ–y-переходе.

Если ограничения (1.33) на создаваемую конструкцию по КТП нежесткие, то в отдельных случаях возможно отступление от тех или иных технологических схем ради снижения расходов φ_τ. Это может привести к изменению числа операций с N до N_1 ($N_1 < N$), но тогда, естественно, меняются параметры технологии (управления), что изменяет функционал качества I объекта и его траекторию.

В другом типичном случае совокупность окончательных свойств (фазовых координат $x(N)$) определяет работоспособность изделия (установки) и прибыль предприятия. Тогда функционал качества целесообразно записать в ином виде:

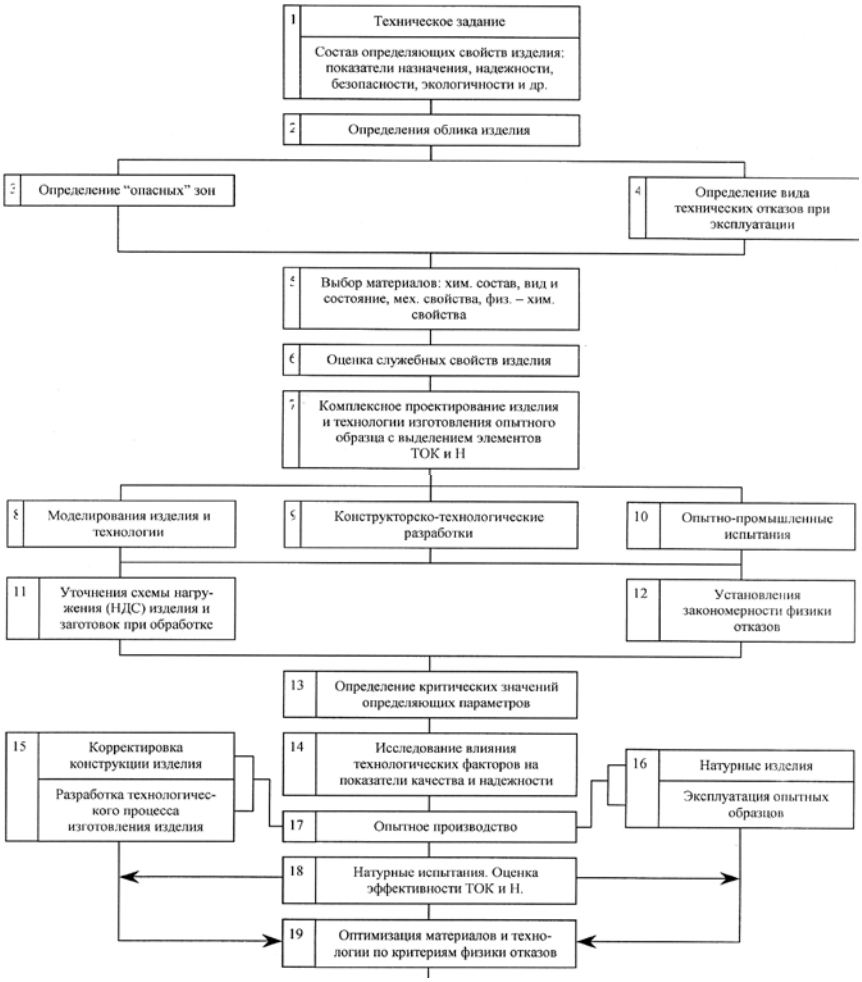
$$I_N(x_o) = \max\left\{\Psi_N(x(\tau-1), U(\tau)) - \sum_{\tau=1}^{N-1} \varphi_\tau(x(\tau-1), U(\tau))\right\}, \tag{1.35}$$

где $\Psi_N(x(N\text{-}1), U(N))$ – прибыль, получаемая в результате обработки деталей на N-й операции при значениях параметров обработки $U(\tau)$, если в результате предшествующих операций получены свойства $x(N\text{-}1)$; $\varphi\tau(x(\tau\text{-}1), U(\tau))$ – расходы на τ–y-переходах. Максимизировать функционал дохода (или качество) можно нередко путем введения новых технологических операций, которые ранее не были включены в технологию, что на формализованном языке означает введение новых координат вектора управления.

На основании вышеизложенного общий подход к технологическому обеспечению качества и надежности создаваемого изделия должен представлять собой многозвенную систему поиска, включающую подготовку и реализацию целевых программ исследования моделированием (аналитическим и физическим) с последующими конструкторско-технологическими разработками и их опытно-промышленными натурными испытаниями, с организацией контроля и управления качеством изготавливаемого изделия, с планированием на основе разработанных моделей и приобретенного опыта подготовки ТЗ и ОКР для новых изделий (рис. 1.21).

Как следует из приведенного функционального алгоритма технологического обеспечения качества и надежности создаваемого изделия (рис. 1.21), на первом этапе (блоки 1...6) устанавливается состав определяющих свойств элемента патрона (патрона в целом) (рассмотрены выше). С учетом их назначения,

определяющих свойств, тенденций в конструировании патронов и технологий их изготовления формируется облик изделия, его элементов, определяются возможные «опасные» зоны и виды технических отказов при функционировании, выбираются вид, состояние и типоразмеры материалов для изготовления элементов, производится расчетно-аналитическим методом оценка функциональных свойств детали как элемента технической системы «патрон».



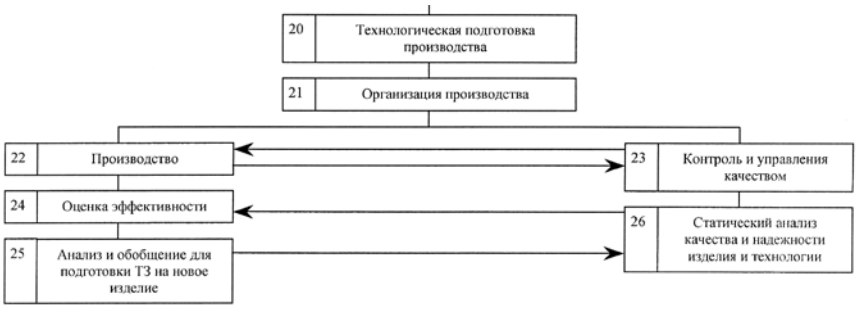


Рис. 1.21. Обобщенный алгоритм технологического обеспечения качества и надежности металлического элемента патрона

На втором этапе (блоки 7...14) решаются задачи моделирования (физического, аналитического, смешанного) процессов изготовления элементов и патрона, испытания с уточнением схем и условий нагружения, установлением закономерностей физики отказов различной природы (технологических и эксплуатационных), исследованием влияния технологических факторов на формирование качества и надежности изделия и установлением критических значений определяющих параметров.

На третьем этапе (блоки 15...19) с учетом результатов предыдущих этапов, опытного производства, натурных испытаний и эксплуатации опытного образца корректируется конструкция изделия (патрона и его элементов), разрабатывается комплексный технологический процесс с оптимизацией применяемых материалов, определяющих режимов обработки по критериям физики технологических и эксплуатационных отказов.

Заключительный, четвертый этап (блоки 20...26) предполагает подготовку и организацию опытных и серийного (массового) производства патронов соответствующих типоразмеров.

Подобная постановка задач технологического обеспечения качества и надежности патронов требует детальной проработки всех процессов обработки, входящих в качестве элементов в комплексную технологию, а также обеспечения контроля качества с чувствительностью, адекватной допустимым отклонениям от проектируемого (нормируемого) уровня показателей качества.

Библиографический список

1. *Данилин Г.А*., Огородников В.П., Заволокин А.Б. Основы проектирования патронов стрелкового оружия: учебник / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2005. 327 с.

2. *Агеев Н.П.,* Данилин Г.А., Огородников В.П.. Технология производство патронов стрелкового оружия. Ч. 1. Технологические основы проектирования патронов: учебник / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2005. 352 с.

2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ПАТРОННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

2.1. Требования, предъявляемые к материалам

Различают три группы требований: эксплуатационные, технологические и производственно-экономические.

К эксплуатационным относятся требования, определяемые тактико-техническими требованиями к патронам, а именно:

- обеспечение прочности и жесткости отдельных элементов и всего изделия при обращении и эксплуатации, в том числе высокое сопротивление ударным нагрузкам в интервале температур ±50˚С;
- длительная сохранность свойств материала, определяемая его устойчивостью против коррозии, коррозионного растрескивания и старения;
- минимальная плотность материала, определяющая минимальную, при прочих равных условиях, массу деталей и патрона в целом;
- нейтральность к порохам и пиротехническим составам.

К группе технологических свойств относятся:

- высокая пластичность и штампуемость материала;
- пригодность к деформационному упрочнению и возможность обеспечения заданных требований по механическим свойствам конструктивных элементов изделий без сложной термической обработки;
- возможность нанесения и удержания антифрикционных и антикоррозионных покрытий;
- пригодность к частичной механической обработке резанием и термической обработке.

Важнейшим технологическим свойством материала является его штампуемость, зависящая от химического состава, состояния (структуры и величины зерна, качества проката по наличию дефектов металлургического происхождения) и соответственно пластичности материала.

В зависимости от назначения и условий работы элементов изделия, а также принятой технологии обработки выбирается материал с определенными механическими и технологическими свойствами.

К производственно-экономическим требованиям относятся:

- недифицитность материала и его невысокая стоимость;
- возможность применения наиболее простых и экономичных способов обработки материала, обеспечивающих минимальную технологическую себестоимость изготовления элементов и всего изделия в целом.

2.2. Виды материалов и сортамент

Все металлические конструкционные материалы делят на три группы: черные прокатные металлы и сплавы (преимущественно стали); цветные прокатные металлы и сплавы; биметаллы. В табл. 2.1 в качестве примера дана область применения основных металлических конструкционных материалов в патронном производстве.

Таблица 2.1

Область применения и сортамент материалов

Марка материала	Наименование элемента патрона	Калибр патрона, мм	Исходный полуфабрикат, размеры в мм
1	2	3	4
Стали			
Сталь 11кп, Сталь 11ЮА	Трубка рубящая	12,7 14,5	Лента 1,37×160×900…1300
	Оболочка	14,5	Лента 1,37×160×900…1300 Лента 1,37×122×900…1300
Сталь 18ЮА	Гильза	5,45 7,62	Полоса 3,2×120×750…2000 Полоса 3,2×120×750…2000
		14,5	Полоса 8,4…8,7×195…205× ×1900…2000
08 КП	Патронная коробка	Для патронов различных калибров	
Латуни			
Латунь Л70	Гильза	5,45-пистолетная 7,62-револьверная 12,7-крупно-калиберная	Полоса DПР×М8,4× ×190 OHD-для 12,7 клб.
Латунь Л90 (томпак)	Наконечник оболочки	12,7 14,5	Лента 0,6×80
Биметаллы			
Биметалл 1	Гильза	7,62 9,0 12,7	Полоса 3,2×123×750…2000 Полоса 2,9×116×750…2000 Полоса 2,9×116×750…2000
	Пиростакан	12,7 14,5	Полоса 2,9×124×2000 Полоса 2,9×138×2000
	Втулка	12,7 14,5	Полоса 2,9×138×2000
Биметалл 3	Оболочка, стакан для трассера, колечко для трассера	5,45	Полоса (лента) 0,99×131×1000…2000
		7,62	Полоса (лента) 1,07×134×1000…2000
		12,7	Полоса (лента) 1,37×159×1000…2000 Лента 1,37×130

Окончание табл. 2.1

1	2	3	4
Свинец			
Свинец С0, С1, С2, С3, С4	Сердечник	Для пуль обыкновенных и трассирующих	Проволока диаметром 5,0…25,0 мм
	Рубашка	Для пуль различного назначения и различных клб.	
Стали			
Конструкционные качественные стали: а) малоуглеродистые (Ст 10, Ст 15, Ст 20, Ст30)	Сердечник для обыкновенных пуль	5,45–9,0	Проволока 5,0…9,0мм
б) со средним содержанием углерода (Ст 45)	Нож для вскрытия коробок	----	Листовой материал
в) с высоким содержанием углерода (65Г, 70, 75, 70С2ХА)	Сердечник для пули повышенной пробиваемости	5,45–9,0	Проволока 5,0…9,0мм
Инструментальная углеродистая сталь (У10А., У12А, У12ХА)	Сердечник для бронебойных пуль	7,62 12,7 14,5	Пруток 10,9…12,43 мм
Металлокерамический твердый сплав ВК8	Сердечник для бронебойных пуль	5,45-12,7 14,5	Порошок
Алюминий (А00, А0, А1, А2, А3, АД, АД1) Медь М1, М2	Стаканчики, колпачки, рубашки, мембраны	Для различных калибров	Лента

Принципиально возможно применение для изготовления сердечников сталей Р9, Р9М4К8, Х12 и некоторых других марок.

По форме исходный материал для изготовления металлических элементов патронов поставляется в виде полос, лент, проволоки (прутков).

К исходным полуфабрикатам предъявляются достаточно высокие требования по точности, регламентированные соответствующими стандартами, что определяется особенностями патронного производства.

2.3. Цветные металлы и сплавы

2.3.1. Латуни

Наиболее широкое применение из цветных металлов и сплавов в патронном производстве находят латуни – медноцинковые сплавы.

Латуни разделяют на двойные (простые) и многокомпонентные. Двойные латуни представляют собой сплавы меди с цинком (Л68, Л70, Л72, Л90 и т.п.) (табл. 2.2). Многокомпонентные латуни содержат, кроме меди и цинка, еще один или несколько легирующих элементов и в патронном производстве не применяются. Взаимодействие меди с цинком при сплавлении характеризу-

ется диаграммой состояния (рис. 2.1). Диаграмма состояния включает в себя пять простых перитектических диаграмм. По отдельным ветвям ликвидуса из жидкости кристаллизуется шесть различных фаз: $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ и η. Наибольшее значение для производства гильз имеют латуни, обрабатываемые давлением с содержанием цинка до 35…39 % (α-латуни, $\alpha+\beta$-латуни).

Таблица 2.2

Химический состав двойных латуней, обрабатываемых давлением

Марка латуни	Состав, %							
	Основные компоненты		Примеси, не более					
	Cu	Zn	Pb	Fe	Sb	Bi	P	Всего
Л96	95,0…97,0	Остальное	0,03	0,10	0,005		0,01	0,2
Л90	88,0…91,0		0,03	0,10	0,005			0,2
Л85	84,0…86,0		0,03	0,10	0,005			0,3
Л80	79,0…81,0		0,03	0,10	0,005	0,002		0,3
Л70	69,0…72,0		0,03	0,07	0,002		0,005	0,2
Л68	67,0…70,0		0,03	0,10	0,005		0,01	0,3
Л62	60,5…63,5		0,08	0,15	0,005		0,01	0,5

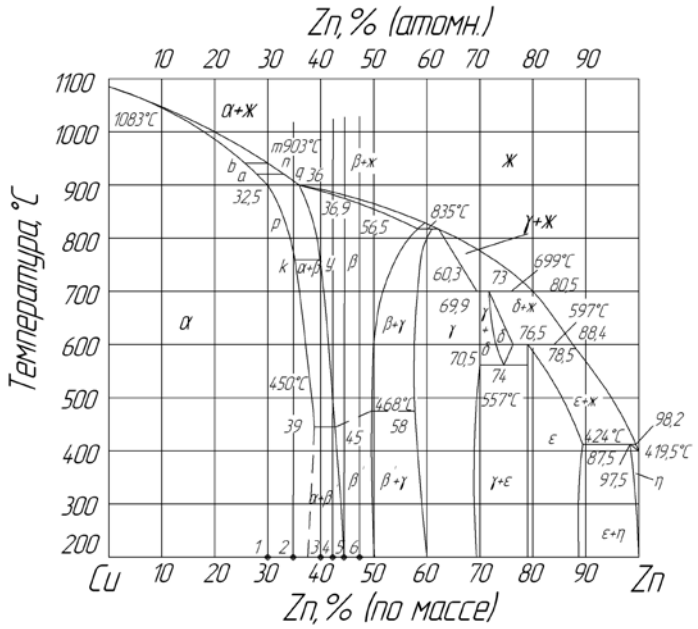


Рис. 2.1. Диаграмма состояния «медь–цинк» (Cu–Zn)

Богатая медью фаза α имеет решетку меди (гранецентрированный куб с периодом a = 3,608°А) и является типичным твердым раствором замещения, где часть атомов меди замещается атомами цинка. Предельная растворимость

цинка в меди при комнатной температуре составляет 38…39 % и практически не меняется до температуры 453°С, а затем, с дальнейшим повышением температуры, уменьшается и при температуре до 903°С составляет 32,5 %. Фаза β является также твердым раствором, но основой его служит химическое соединение CuZn с решеткой объемно-центрированного куба с периодом a = 2,94°А. Фаза β при высоких температурах имеет значительную область гомогенности (от 37 до 57 % Zn), однако с понижением температуры эта область значительно сужается (45-49 % Zn). В сплавах, лежащих по одну и другую сторону от указанной области, происходит распад β-фазы с выделением α- или γ-кристаллов (см. рис. 2.1). Фаза γ является твердым раствором на основе нового химического соединения Cu_5Zn_8 (со сложной кубической решеткой с периодом a = 8,83°А).

Следует отметить, что фазы β и γ характеризуются также определенным отношением числа валентных электронов к числу атомов (фаза β – 3/2, фаза γ – 21/13), поэтому их часто называют соединениями электронного типа. Выше температур 450…470°С (см. пунктирную линию на рис. 2.1) β-фаза является неупорядоченным твердым раствором, т.е. раствором, характеризующимся беспорядочным распределением атомов меди и цинка в решетке соединения CuZn. Ниже указанных температур (различных для различных составов сплавов) наблюдается упорядочение в расположении атомов в решетке β-фазы; при этом атомы меди располагаются в вершинах куба, а атомы цинка – в его центре. Образующийся упорядоченный раствор обычно обозначают β′. Переход неупорядоченного твердого раствора в упорядоченный сопровождается резким падением пластичности и повышением хрупкости сплавов, что затрудняет их обработку. На практике применяют β-латуни с содержанием 45…47 % цинка; и во избежание хрупкости их обработку производят в горячем состоянии. На рис. 2.1 показана схема кристаллизации и последующих фазовых превращений типовых латуней, применяемых в производстве. Сплав 1, содержащий в своем составе 30 % Zn (латуни типа Л70), кристаллизуется в одну стадию по схеме

$$L_{(30\%Zn)} \underline{950 - 915^{\circ}C} \rightarrow \alpha(b - a)$$

(в скобках показано изменение состава выпадающих кристаллов α – твердого раствора). В литом виде латунь имеет типичную дендритную структуру, свойственную всем твердым растворам (для слитков характерна ярко выраженная зональность в строении, причем кристаллы наружной зоны растут перпендикулярно стенкам изложницы). После отжига литой латуни химическая неоднородность в пределах зерна устраняется и получается однородная зернистая структура. Если отжигу предшествовала деформация, получается типичная рекристаллизационная структура с характерными двойниковыми зернами (рис. 2.2). Размер зерна рекристаллизованной α-латуни зависит от степени де-

формации, режимов отжига и может в зависимости от этого меняться в широком диапазоне. Сплав 2, содержащий в составе 35% Zn (латуни типа Л68), кристаллизуется в две стадии: 1-я стадия (первичная кристаллизация)

$$L \ \underline{t_1 - 903^{\circ}C} \rightarrow \alpha(a - p) + L(n - q)$$

(в скобках указано изменение состава твердой и жидкой фаз); 2-я стадия (перитектическая кристаллизация)

$$L_{(\partial)} + \alpha_P \underset{\leftarrow\ --}{\overset{--\ \rightarrow}{903^{\circ}C}} \beta_{(S)} + L_{(p)}\,.$$

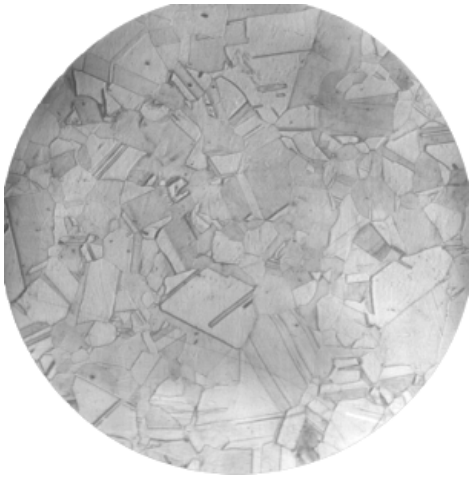


Рис. 2.2. Типичная микроструктура отожженной латуни

Так как в данном случае перитектическая реакция протекает при недостатке жидкой фазы, то при этом растворяется только незначительная часть α-кристаллов. При дальнейшем охлаждении сплава, вследствие того, что растворимость цинка в меди увеличивается с понижением температуры, происходит растворение β-кристаллов в α-фазе, т.е.

$$\alpha + \beta \underline{903^{\circ}C} - \underline{750^{\circ}C} \ \alpha(p - \kappa)$$

(при содержании цинка 32 %–33 %, т. ”к” будет располагаться в области более высоких температур).

При температуре, соответствующей т. “к” на диаграмме состояния, β-фаза полностью растворяется, и при дальнейшем охлаждении вплоть до комнатной температуры сплав находится в однофазном состоянии. Однако все сказанное выше относится к тому случаю, когда сплав охлаждается медленно и все фазовые превращения проходят полностью. Практика показывает, что в производственных условиях охлаждения в сплавах с содержанием 32 % Zn можно обнаружить β-кристаллы, не успевшие раствориться в α-фазе при бы-

стром охлаждении. В результате сплав имеет неравновесную структуру, состоящую из α- и β-кристаллов. Отмечается включение кристаллов β-фазы и в сплавах, содержащих до 70 % меди, которые, как правило, при последующей деформации и рекристаллизационном отжиге исчезают. При обработке давлением в горячем и холодном состояниях и термической обработке большое значение имеет состав фаз, размер и форма зерен. При прокатке, волочении и штамповке предпочтительна мелкокристаллическая структура с величиной зерна менее 0,1 мм. По эксплуатационным механическим и технологическим свойствам оптимальным составом двухкомпонентных латуней служат составы, отвечающие содержанию цинка 25…32 % (рис. 2.3, 2.4). Однако существенным недостатком двухкомпонентных латуней является склонность к коррозионному или иначе называемому “сезонному” растрескиванию при длительном хранении. Условиями возникновения коррозионного растрескивания служат наличие в поверхностных слоях растягивающих напряжений, являющихся следствием неравномерности холодной пластической деформации, и воздействие агрессивной среды (влаги и кислорода с присутствием в атмосфере следов аммиака, сернистого газа и других примесей).

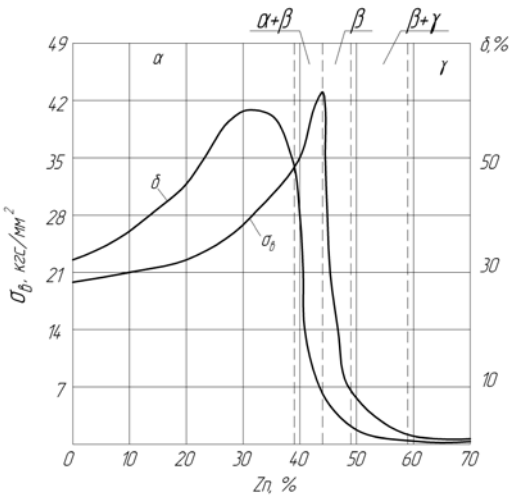


Рис. 2.3. Механические свойства литых медно-цинковых сплавов в зависимости от содержания цинка

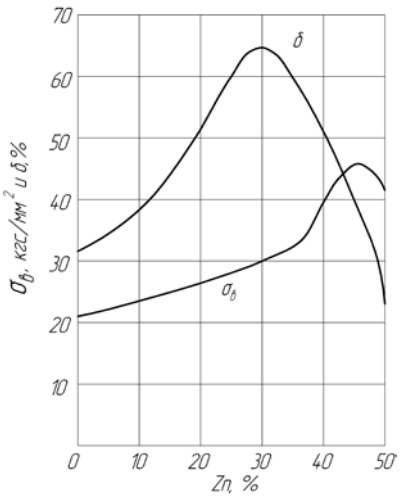


Рис. 2.4. Влияние содержания цинка на механические свойства прокатанных и отожженных медно-цинковых сплавов

Латуни, содержащие не более 7…10 % цинка, малочувствительны к коррозионному растрескиванию. Латуни с содержанием цинка 30 % и более (марок Л68, Л62 и др.) наиболее чувствительны к растрескиванию при относительно длительном, негерметичном хранении в складских условиях. Поэтому для производства латунных гильз одноразового использования к патронам

стрелкового оружия клб. 12,7, при условии применения герметичной укупорки предпочтительно применение латуни Л70.

В табл. 2.3 приведены нормированные по ГОСТ 931-90 механические свойства латуней, в табл. 2.4 – 2.8 даны механические свойства, установленные в результате исследований различных авторов [1–6].

Таблица 2.3

Механические свойства латуней

Марка латуни	Состояние материала	Толщина, мм		Ширина, мм		Временное сопротивление $\sigma_в$, Н/мм^2 (кгс/мм^2)	Относительное удлинение δ_{10}, % не менее
		листа	полосы	листа	полосы		
1	2	3	4	5	6	7	8
А. Характеристики базового исполнения							
Л90	Мягкий	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 12,00	От 0,40 до 12,00	До 800 До 600 включ.	До 600	От 230 (24) до 340 (35)	36
	Полутвердый	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 12,00	От 0,40 до 12,00	До 800 До 1000	До 600	От 260 (30) до 390 (40)	10
	Твердый	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 10,00	От 0,40 до 10,00	До 800 До 1000	До 600	Не менее 350 (36)	3
Л85	Мягкий	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 12,00	От 0,40 до 12,00	До 800 До 1000	До 600	От 250 (26) до 360 (37)	38
Л85	Полутвердый	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 12,00	От 0,40 до 12,00	До 800 До 1000	До 600	От 320 (33) до 430 (44)	12
	Твердый	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 10,00	От 0,40 до 10,00	До 800 До 1000	До 600	Не менее 390 (40)	3
Л80	Мягкий	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 12,00	От 0,40 до 12,00	До 800 До 1000	До 600	От 260 (27) до 370 (38)	40
	Полутвердый	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 12,00	От 0,40 до 12,00	До 800 До 1000	До 600	От 330 (34) до 430 (44)	15
	Твердый	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 10,00	От 0,40 до 10,00	До 800 До 1000	До 600	Не менее 390 (40)	3

Окончание табл. 2.3

1	2	3	4	5	6	7	8
Л68	Мягкий	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 12,00	От 0,40 до 12,00	До 800 До 1000	До 600	От 290 (30) до 470 (48)	20
	Полутвердый	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 12,00	От 0,40 до 12,00	До 800 До 1000	До 600	От 330 (34) до 430 (44)	10
	Твердый	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 10,00	От 0,40 до 12,00	До 800 До 600 включ.	До 600	От 230 (24) до 340 (35)	36
	Особо твердый	От 0,40 до 2,00	От 0,40 до 2,00	До 600 включ.	До 600	Не менее 520 (53)	–
Л63	Мягкий	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 12,00	От 0,40 до 12,00	До 800 До 1000	До 600	От 290 (30) до 400 (41)	38
	Полутвердый	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 12,00	От 0,40 до 12,00	До 800 До 1000	До 600	От 340 (35) до 470 (48)	20
	Твердый	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 10,00	От 0,40 до 10,00	До 800 До 1000	До 600	От 410 (42) до 570 (58)	8
	Особо твердый	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 2,00	От 0,40 до 2,00	До 600 включ.	До 600	От 510 (52) до 640 (65)	4
	Пружинно-твердый	От 0,40 до 0,60 От 0,70 до 12,00	От 0,40 до 12,00	До 800 До 1000	До 600	Не менее 610 (62)	–
Б. Характеристики исполнения, устанавливаемые по требованию потребителя							
Л90	Мягкий	–	–	–	–	От 230 (24) до 320 (35)	36
	Полутвердый	–	–	–	–	От 290 (30) до 370 (38)	10
Л68	Мягкий	–	–	–	–	От 280 (29) до 370 (38)	42
Л63	Мягкий	–	–	–	–	От 290 (30) до 390 (40)	40
	Полутвердый	–	–	–	–	От 350 (35) до 450 (46)	22
	Твердый	–	–	–	–	От 430 (42) до 530 (54)	8

П р и м е ч а н и е. Способ изготовления – холоднокатаные.

Таблица 2.4

Твердость холоднокатаных листов и полос

Марка латуни	Состояние материала	Твердость по Бринелю	Марка латуни	Состояние материала	Твердость по Бринелю
Л90	Мягкий	60	Л68	Мягкий	70
	Полутвердый	85		Полутвердый	105
	Твердый	110		Твердый	125
Л85	Мягкий	65		Особотвердый	155
	Полутвердый	95	Л63	Мягкий	70
	Твердый	110		Полутвердый	105
Л80	Мягкий	65		Твердый	135
	Полутвердый	95		Особотвердый	160
	Твердый	110			

Таблица 2.5

Влияние скорости процесса деформации на механические свойства латуни Л68

Скорость деформирования v, м/с	Скорость относительной деформации $\dot{\varepsilon}, с^{-1}$	Характеристики механических свойств							
		$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	σ_{iy}	S_{ky}	ε_{iy}	ε_{ip}	δ	ψ
		МПа							
$1{,}0\cdot10^2$	$2{,}0\cdot10^{-4}$	110	330	500	870	0,42	1,4	0,63	0,76
$2{,}0\cdot10^2$	$4{,}0\cdot10^{-4}$	100	330	510	870	0,44	1,4	0,63	0,76
$6{,}0\cdot10^2$	$2{,}0\cdot10^{-1}$	120	320	480	810	0,40	1,4	0,61	0,74
$1{,}5\cdot10^2$	5,5	150	340	520	920	0,42	1,4	0,66	0,76

Таблица 2.6

Влияние скорости процесса деформации на коэффициенты степенной зависимости $\sigma_i = A\cdot\varepsilon^n$ интенсивности напряжений σ_i от интенсивности деформации ε_i латуни Л68

Коэффициент	Скорость относительной деформации $\dot{\varepsilon}, с^{-1}$			
	$2{,}0\cdot10^{-4}$	$4{,}0\cdot10^{-4}$	$2{,}0\cdot10^{-1}$	5,5
A, МПа	71,0	71,0	66,0	63,0
n	0,45	0,45	0,40	0,35

Таблица 2.7

Влияние температуры процесса деформации на механические свойства латуней $(\sigma_в, МПА;\ \delta,\%)$

Марка латуни	Температура процесса, °С									
	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Л90	310	250	220	180	140	100	70 18	40 18	30 17	20 15
Л80	290	490	400	260	120	60	30 20	20 24	20 28	10 34
Л68	320	440	410	320	180	100 22	50 54	30 52	20 72	— 35

Окончание табл. 2.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Л66	380	590	520	360	150 34	80 26	50 18	30 16	20 14	—
Л62	360	320	280	220	150	80 25	40 25	20 30	10 50	— 65
Л59	360	340	280	200	100 33	50 30	20 29	20 40	20	—

Примечание. В числителе приведены значения $\sigma_в$, в знаменателе – δ.

Таблица 2.8

Математические модели характеристик механических свойств латуни Л68

Механические свойства	Модель	Пределы применимости
$\sigma_в$, кгс/мм^2	$\sigma_в = 29 + 45{,}9 \cdot e_i - 13{,}8 \cdot e_i^2$	$e_i = 0{,}2 \ldots 1{,}6$
	$\sigma_в = 38{,}6 + 53{,}6 \cdot e_i - 4{,}5 \cdot t - 11{,}87 \cdot e_i \cdot t + 0{,}34 \cdot e_i \cdot \tau + 0{,}153 \cdot t \cdot \tau - 10{,}54 \cdot e_i^2 - 0{,}0073 \cdot \tau^2$	$e_i = 0{,}2 \ldots 1{,}6$ $t = T_{отж}/100 = 2 \ldots 7$ $\tau = 30 \ldots 90$, мин
HV	$HV = 58 + 171{,}3 \cdot e_i - 58{,}3 \cdot e_i^2$	$e_i = 0{,}2 \ldots 1{,}6$
	$HV = 146 + 181{,}1 \cdot e_i - 26{,}6 \cdot t - 0{,}52 \cdot \tau - 37{,}26 \cdot e_i \cdot t + 1{,}11 \cdot e_i \cdot \tau + 0{,}61 \cdot t \cdot \tau - 39{,}34 \cdot e_i^2 - 0{,}0025 \cdot \tau^2$	$e_i = 0{,}2 \ldots 1{,}6$ $t = T_{отж}/100 = 2 \ldots 7$ $\tau = 30 \ldots 90$, мин
δ,%	$\delta = 13{,}4 - 9{,}4 \cdot \ln e_i$	$e_i = 0{,}2 \ldots 1{,}6$
	$\delta = 55{,}3 - 100{,}6 \cdot e_i + 20{,}8 \cdot e_i \cdot t - 0{,}84 \cdot e_i \cdot \tau - 0{,}37 \cdot t \cdot \tau + 27{,}37 \cdot e_i^2 + 1{,}70 \cdot t^2 + 0{,}0187 \cdot \tau^2$	$e_i = 0{,}2 \ldots 1{,}6$ $t = T_{отж}/100 = 2 \ldots 7$ $\tau = 30 \ldots 90$, мин

В табл. 2.9–2.10 даны основные физические и технологические свойства латуней.

Таблица 2.9

Физические свойства латуней

Марка латуни	Показатели свойств				
	Модуль упругости E, ГПа	Плотность ρ, г/см^3	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^5$, 1/С	Коэффициент теплопроводности λ, $B_т/(м,^\circ С)$	Удельная теплоемкость C, кал/(г·град)
Л96	114	8,85	18,1	58	93
Л90	110	8,80	18,2	40	90
Л85	105	8,75	18,7	36	—
Л80	105	8,65	19,1	34	93
Л70	105	8,53	19,9	29	—
Л68	105	8,50	19,9	28	93
Л62	100	8,43	20,6	26	92

Т а б л и ц а 2.10

Технологические свойства латуней

Марка латуни	Температурный интервал рекристаллизационного отжига, °С	Температуры до рекристаллизационного отжига, °С	Обрабатываемость резанием, %	Линейная усадка, %
Л96	540…600	—	20	—
Л90	650…720	200	20	2,0
Л85	650…720	160…200	30	—
Л80	600…700	260	30	2,0
Л70	540…650	260…270	30	1,92
Л68	520…650	260…270	30	1,92
Л62	600…700	270…300	40	1,77

П р и м е ч а н и я. 1. За 100 % обрабатываемость резанием принимается для латуни ЛС63-3.
2. В качестве покровного флюса для всех сплавов применяется древесный уголь.

На рис. 2.5–2.8 показано влияние степени деформации и температуры последующего отжига на механические свойства латуни Л70, на рис. 2.9 приведены диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$.

Диаграммы “интенсивность напряжений–интенсивность деформаций” $\sigma_i - \varepsilon_i$ могут быть аппроксимированы при невысоких скоростях процесса $\dot{\varepsilon}_i$ до $4{,}0 \cdot 10^{-4} c^{-1}$ аналитическими зависимостями в виде:

а) степенной функции $\sigma_i = 710 \cdot (\varepsilon_i)^{0{,}45}$, МПа, если $0{,}002 \le \varepsilon_i \le 2\varepsilon_{iy}$,

$\sigma_i = \sigma_{iy} \cdot 2^{\varepsilon_{iy}} (1 + 0{,}5\varepsilon_i - \varepsilon_{iy})$, МПа, если $2\varepsilon_{iy} \le \varepsilon_i \le \varepsilon_{ip}$;

б) многочлена $\sigma_i = 1220 - 1412e^{-\varepsilon_i} - 28e^{-15\varepsilon_i}$, МПа.

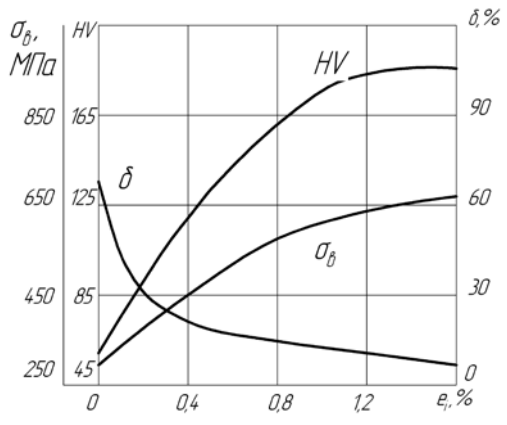


Рис. 2.5. Зависимость характеристик механических свойств латуни Л70 от степени деформации

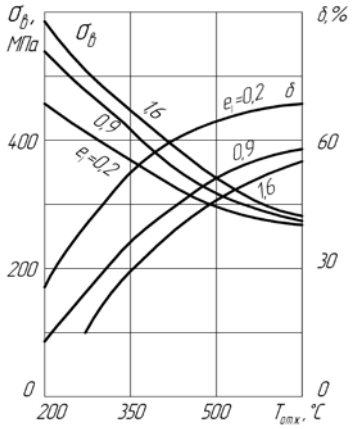
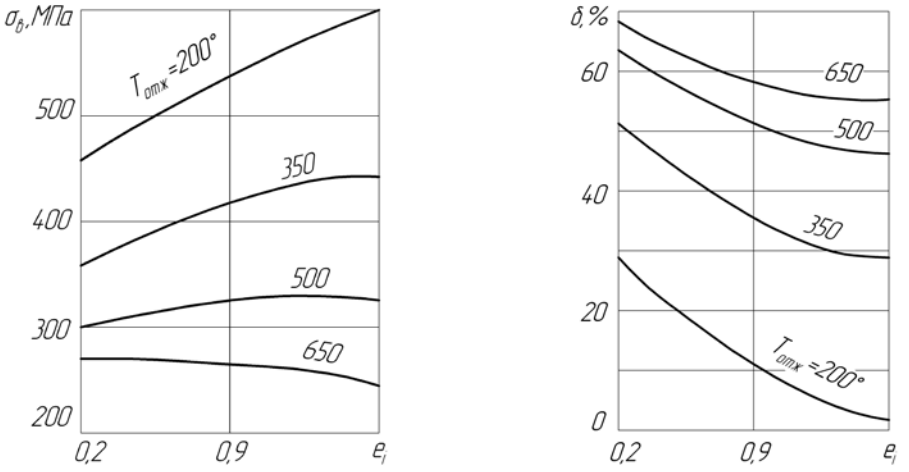


Рис. 2.6. Зависимость характеристик механических свойств наклепанной латуни Л70 от температуры последующего отжига



а *б*

Рис. 2.7. Зависимость временного сопротивления $\sigma_в$ (*а*) и относительного удлинения δ (*б*) латуни Л70 от степени деформации e_i и температуры последующего отжига $T_{отж}$, °С

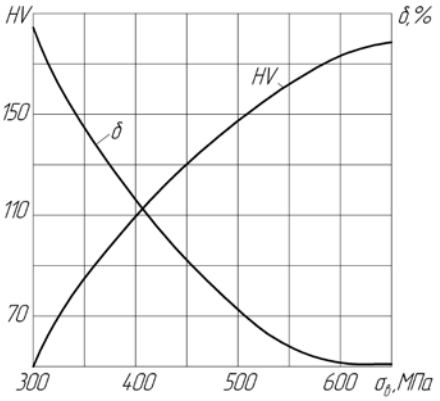


Рис. 2.8. Зависимость относительного удлинения δ твердости *HV* латуни Л70 от временного сопротивления $\sigma_в$

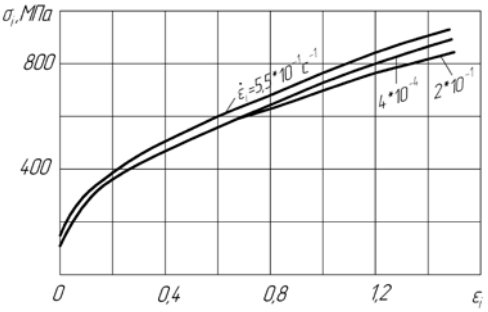


Рис. 2.9. Диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ латуни Л70 при различных скоростях деформации

2.3.2. Свинец

Свинец среди других технических материалов выделяется относительно высокой плотностью, низкой температурой плавления, малой твердостью, высокой пластичностью и коррозионной стойкостью. Эти свойства и предопределили его применение для изготовления сердечников к обыкновенным пулям и рубашек к пулям различного назначения.

Рубашки, изготовленные из свинца, обеспечивают, ввиду низкой твердости и высокой пластичности, при сборке высокую плотность монтажа элементов пули и, соответственно, требуемые баллистические свойства пули. Ниже приведены физические свойства свинца.

Атомный вес	207,19
Кристаллическая решетка	Г.Ц.К
Периоды решетки, А	a=4,9389
Плотность, г/см^3	11,34
Температура плавления, °С	327,4
Температура кипения, °С	1734
Удельная теплоемкость при 20°С, кал/г·град	0,031
Теплопроводность, кал/см·с·град	0,0827 (20°С)
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/град	29,1 (20°С)

Свинец практически не упрочняется при холодной пластической деформации, так как температура его рекристаллизации ниже комнатной ($T_{\text{р}} \cong 0{,}4T\ ^\circ\text{К} \cong -53^\circ\text{С}$).

Технический свинец всегда содержит примеси. Содержание свинца согласно техническим условиям (ГОСТ 3378-98) составляет в марках: С1 – 99,98 %, С2 – 99,95 %, С3 – 99,9%, С4 – 99,6%.

В сухом воздухе свинец не окисляется, во влажном покрывается тусклой окисной пленкой, обладающей хорошими защитными свойствами, устойчив против действия кислот (серной, соляной). При добавлении небольшого количества сурьмы (1-2%) повышается технологическая жесткость сплава. В этом случае может формироваться сплав систем Pb–Sb (свинец–сурьма). Согласно диаграмме состояния Pb–Sb структура сплава состоит из первичных кристаллов $\beta\,(\text{Sb})$-твердого раствора и эвтектики $\alpha(\text{Pb}) + \beta(\text{Sb})$, кроме этого, при наличии в сплаве меди образуются кристаллы химического соединения Cu_2Sb. Мягкой основой сплава является свинец, роль твердой составляющей выполняют частицы $\beta(\text{Sb})$-фазы и химического соединения Cu_2Sb.

Свинец марок С1, С2, С3 имеет следующие характеристики механических свойств: временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$ = 19,6…24,5 МПа, относительное удлинение δ = 45…50 %.

На рис. 2.10 приведены диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ для различных скоростей деформации свинца с добавкой 1 % сурьмы, свидетельствующие о значительном влиянии скорости деформации на сопротивление материала деформированию.

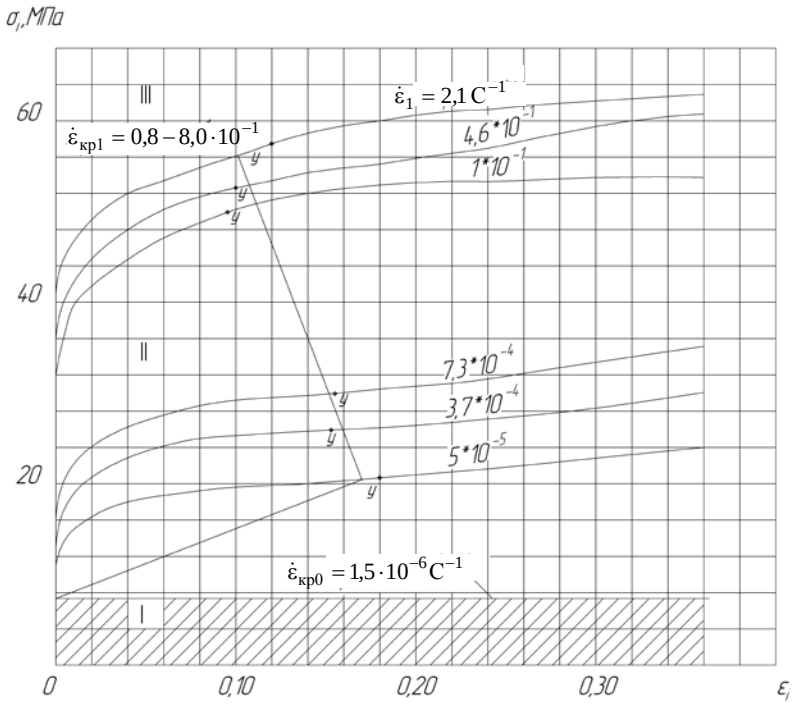


Рис. 2.10. Диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ для свинца с добавкой 1% сурьмы при различных скоростях деформации: *I* – область условной «горячей» деформации (материал не упрочняется); *II* – область условной «полугорячей» деформации; *III* – область холодной деформации

2.4. Черные металлы

2.4.1. Стали

Группу черных металлов составляют стали и металлокерамические твердые сплавы.

Широкое применение в отечественном патронном производстве находят более дешевые и менее дефицитные, чем латуни, материалы – стали. Можно выделить следующие направления использования стали:

1) применение малоуглеродистых (до 0,13 %) конструкционных качественных (11кп) и нестареющих повышенного качества (11ЮА) сталей как для изготовления металлических элементов патрона типа оболочек, так и для изготовления биметалла 3;

2) применение конструкционных качественных (18кп) и нестареющих повышенного качества (18ЮА) с увеличенным содержанием углерода (до 0,22…0,25 %) для изготовления гильз и биметалла 1;

3) применение конструкционных качественных сталей со средним содержанием углерода (до 0,45 %) для изготовления сердечников к пулям обыкновенного действия и до 0,70% к пулям повышенной пробиваемости;

4) применение инструментальных углеродистых сталей для изготовления бронебойных сердечников.

Второе направление обеспечивает изготовление, в основном, гильз с требуемыми по условиям эксплуатации повышенными прочностными свойствами. Химический состав сталей первых двух групп приведен в табл. 2.11.

Таблица 2.11

Химический состав сталей для изготовления гильз, оболочек и других полых тонкостенных элементов патронов

Марка стали	ГОСТ	Массовая доля элементов, %								
		C	Mn	Al	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
					не более					
11ЮА	803-81	0,08…0,13	0,30…0,50	0,02…0,07	0,13	0,025	0,025	0,15	0,25	0,20
11кп	1050-74	0,05…0,12	0,30…0,50	—	0,06	0,035	0,030	0,15	0,25	0,20
18ЮА	803-81	0,16…0,22	0,20…0,40	0,02…0,07	0,13	0,025	0,025	0,20	0,25	0,20
18кп	1050-74	0,12…0,20	0,30…0,50	—	0,06	0,035	0,030	0,20	0,25	0,20

С металловедческой точки зрения стали первых трех групп относятся к доэвтектоидным, а четвертой группы – к заэвтектоидным. Наиболее полно фазовый состав сталей характеризуется диаграммой фазового состояния (метастабильного равновесия) Fe–C (рис. 2.11). Следует иметь в виду, что всякая диаграмма состояния показывает условия равновесного существования фаз во взятой системе компонентов. Полное физико-химическое равновесие между фазами может быть достигнуто только в специальных лабораторных условиях, а на практике некоторым приближением к этому состоянию может быть случай чрезвычайно медленного охлаждения или нагрева сплава с весьма длительными выдержками во времени при любых температурах.

Анализ фазовой диаграммы состояния показывает, что первый компонент разбираемой системы – чистое железо –существует в двух различных аллотропических формах: при температурах до 910 ˚C$Fe-\alpha$, имеющей строение атомной кристаллической решетки в виде объемно-центрированного куба (ОЦК) с параметром a = 2,86А˚; при температурах от 910˚C до 1390˚C $Fe-\gamma$, имеющей строение атомной кристаллической решетки в виде гранецентрированного куба (ГЦК) с параметром a = 3,63А˚. При температурах от 1390˚C и до температуры плавления $T_{пл}$ = 1535˚C $Fe-\gamma \rightarrow Fe-\delta$, однако эта модификация имеет атомную кристаллическую решетку, аналогичную решетке $Fe-\alpha$, но с несколько большим периодом решетки a = 2,93 А˚ (при 1425˚C).

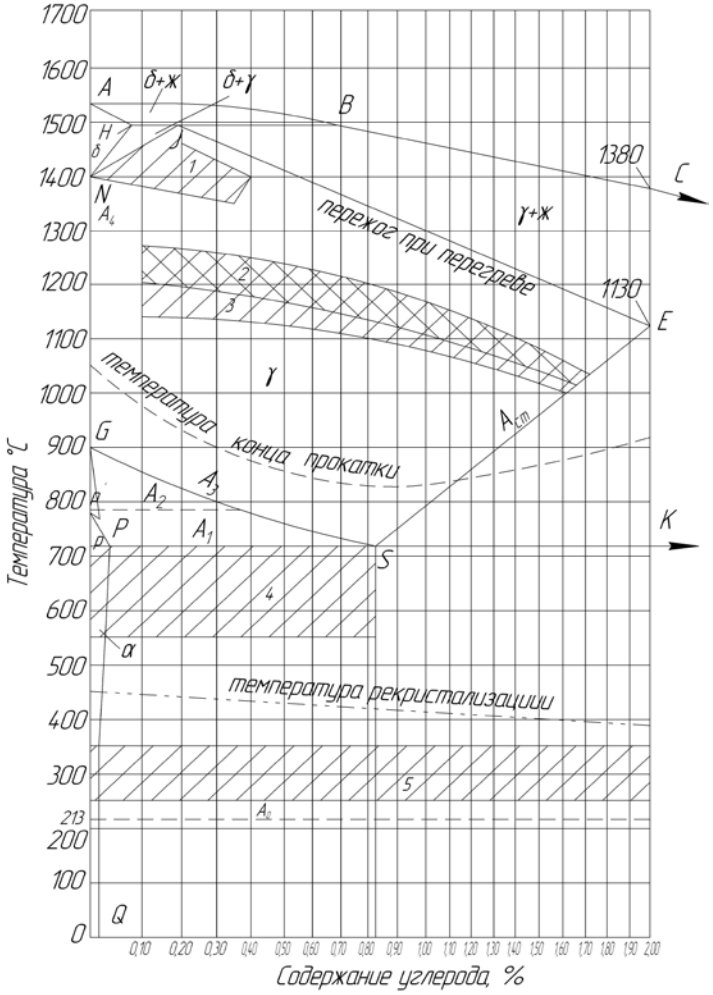


Рис. 2.11. Диаграмма состояния «железо–углерод» Fe-C с областями характерных температур: *1* – кузнечной сварки; *2* – нагрева стали для прокатки; *3* – начала прокатки; *4* – субкритической горячей обработки давлением; *5* – синеломкости (дисперсионного твердения)

При переходе $Fe-\alpha \rightarrow Fe-\gamma$ наблюдается уменьшение объема, а при переходе $Fe-\gamma \rightarrow Fe-\alpha$ – увеличение.

Вторым компонентом разбираемой системы является углерод, который присутствует в сплавах с железом в виде графита или карбида железа, Fe_3C, называемого цементитом.

Параметр кристаллической решетки графита в слоях равен 1,42 А˚, а между отдельными слоями 3,40 А˚.

В системе сплава Fe-C согласно диаграмме состояния фазами являются:

1) жидкий раствор углерода в железе;

2) графит (С);

3) цементит (Fe_3C);

4) твердый раствор углерода в Fe – α (феррит);

5) твердый раствор углерода в Fe – γ (аустенит);

6) твердый раствор углерода в Fe – δ.

Фазами называют однородные части системы (сплава), имеющие одинаковый состав, одно и то же агрегатное состояние и отделяющиеся от остальных частей системы поверхностями раздела.

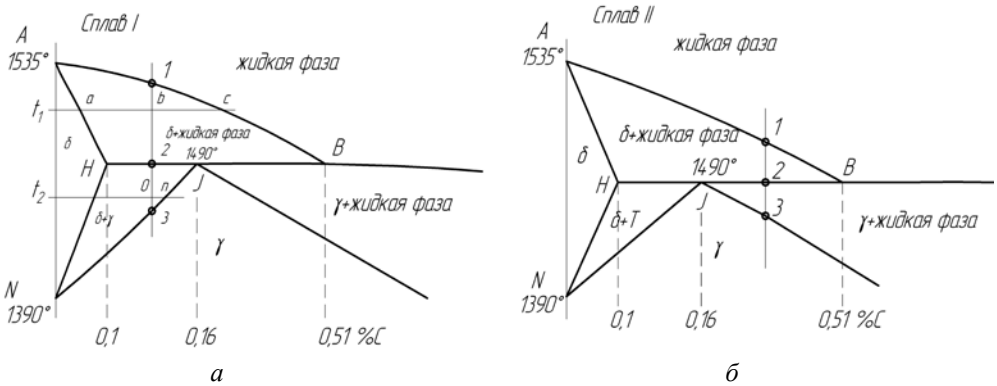
В жидком растворе углерода в железе углерод находится в ионном виде и растворяется в неограниченных количествах. При этом расположение атомов в жидком расплаве не является хаотическим, наблюдается так называемый "ближний" порядок (правильность размещения относительно данного атома близких к нему соседей).

Цементит является упорядоченным твердым раствором углерода в железе с присущим ему относительно большим постоянством состава. Упаковка атомов в решетке цементита (решетка цементита орторомбическая) и расстояния между атомами весьма сходны с теми, которые наблюдаются в твердом растворе углерода в железе – γ.

В твердом растворе углерода в Fe-α углерод образует с железом твердый раствор типа внедрения, когда атомы углерода размещаются в промежутках ("порах") между атомами железа. Растворимость углерода в феррите не превышает 0,04 % при 723˚С.

Весьма важным свойством Fe-γ является значительно большая растворимость углерода (до 1,7 % С при 1145˚С). Углерод в твердом растворе Fe-γ находится в атомарном виде, независимо от того, с цементитом или с графитом образована система. Железо Fe-δ растворяет в себе углерод в незначительных количествах (до 0,10 % при 1490˚С).

На рис. 2.12 показаны схемы первичной и вторичной кристаллизации сплавов с различным содержанием углерода.



а *б*

Рис. 2.12. Схемы первичной и вторичной кристаллизации сплавов Fe-C с малым I (*а*) и повышенным II (*б*) содержанием углерода

Затвердевание сплава с содержанием углерода 0,12% (рис. 2.12,*а*) начинается в т. *1* с выделением кристаллов δ-твердого раствора ($Fe-\delta$). С дальнейшим охлаждением продолжается процесс кристаллизации. При этом состав жидкой фазы будет непрерывно изменяться по линии ликвидуса от т. *1* до т. *B*, а состав кристалла δ-твердого раствора – по линии *aH* к т. *H*.

Вместе с изменениями химического состава жидкой и твердой фаз будут изменяться и их весовые количества.

При температуре 1490°С жидкая фаза т. *B* будет реагировать с δ-твердым раствором предельной насыщенности, состава т. *H*, в результате чего образуется некоторое количество новой твердой фазы – аустенита, состава т. *J*. Во время протекания перитектической реакции сплав состоит из трех фаз: жидкого сплава, δ-твердого раствора и аустенита. По окончании перитектической реакции рассматриваемый сплав будет состоять из двух фаз: δ-твердого раствора точки *H* и аустенита состава т. *J*.

В интервале температур от т. *2* (1490°С) до т. *3* δ-твердый раствор будет постепенно переходить в аустенит вследствие перестройки $Fe-\delta$ в $Fe-\gamma$. Количество δ-твердого раствора при охлаждении уменьшается, а количество аустенита увеличивается.

В т. *3* (A_4) процесс перекристаллизации закончится полностью, и дальше сплав с содержанием углерода 0,12 % будет охлаждаться в состоянии аустенита (сталь при этих температурах состоит из одной только аустенитной фазы). Характерной особенностью вторичной кристаллизации сплава при охлаждении (так же как и всех доэвтэктоидных сплавов) является связь первой стадии процесса с аллотропическим превращением $Fe-\gamma$ аустенита в форму $Fe-\alpha$ по линии G–S (рис. 2.11). Ввиду того, что образующийся $Fe-\alpha$ (феррит) обладает малой растворимостью углерода, в оставшихся при этом порциях аустенита должна повышаться концентрация углерода (до 0,83 %). Вторичная кристаллизация завершается эвтектоидным распадом последних порций аустенита, с концентрацией углерода в 0,83 % при постоянной температуре 723°С с образованием механической смеси двух фаз: феррита и цементита, т.е.

$$\gamma_{0,83} \rightarrow \alpha - Fe + Fe_3C.$$

При дальнейшем охлаждении сплав почти не будет испытывать никаких фазовых превращений, за исключением выделения цементита из феррита по линии PQ, за счет чего общее количество цементита несколько увеличивается. Чаще всего при эвтектоидном распаде образуется пластинчатая смесь феррита и цементита в форме эвтектоидной колонии – перлита.

В сплавах с содержанием углерода 0,22 % (сплав 2) (рис. 2.11,*б*) вторичная кристаллизация протекает аналогично сплаву 1, некоторые отличия наблюдаются при протекании первичной кристаллизации. В отличие от первого сплава перитектическое превращение заканчивается тем, что δ-твердый рас-

твор уйдет из системы, а останутся вновь образованная твердая фаз – аустенит состава т. *J* и не полностью израсходованная жидкая фаза состава т. *B*.

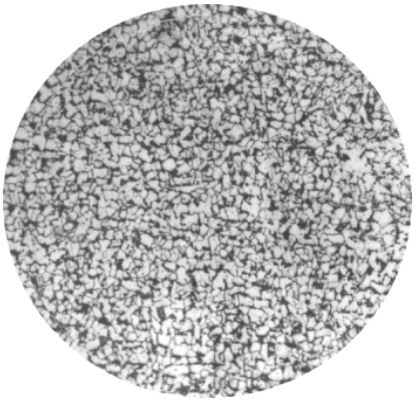


Рис. 2.13. Микроструктура доэвтектоидной стали 11ЮА

В т. *3* состав полностью кристаллизуется и будет находиться в состоянии аустенита. На рис. 2.13 показана микроструктура доэвтектоидной стали (11ЮА). Микроструктура стали состоит из равноосных зерен феррита и равномерно распределенного зернистого или сорбитообразного перлита.

В табл. 2.12 даны нормируемые стандартами механические свойства сталей первых двух групп, в табл. 2.13 – справочные данные по физико-механическим свойствам сталей 3-й и 4-й групп.

Таблица 2.12

Механические свойства углеродистых сталей первой и второй групп

Марка стали	Состояние поставки			ГОСТ	$\sigma_в$, МПа (кгс/мм^2)	δ_{10},%
	Вид	Толщина проката, мм	Термообработка			не менее
11кп	Лента холоднокатаная	1,37	Отожженная	8851-75	265…363 (27…37)	27,0
11ЮА					294…412 (30…42)	28,0
11кп	Прокат полосовой, горячекатаный для плакирования	22,0	Без термической обработки, с травленой поверхностью	803-81	265…363 (27…37)	27,0
11ЮА				807-78	284…402 (29…41)	28,0
18ЮА 18кп	Прокат полосовой, горячекатаный для плакирования	32,0	Без термической обработки, с травленой поверхностью	803-81	304…397 (31…40,5)	28,5
				806-76		
18ЮА	Полосы горячекатаные	6,50…8,55	Нормализация с высоким отпуском	15883-70	353…441 (36…45)	30,0
18ЮА	Холоднокатаная	3,2	Без термической обработки	—	331…441 (34…45)	30,0
18кп	Лента горячекатаная	2,8		1530-78	340…450 (34,7…45,9)	27,0

Таблица 2.13

Физико-механические свойства сталей третьей и четвертой групп

Марка стали	Температура критических точек, ˚С		Плотность, г/см^3	$\sigma_в$, МПа (кгс/мм^2)	$\sigma_{0,2}$, МПа (кгс/мм^2)	δ, %	ψ, %	HB, МПа (кгс/мм^2)	$a_к$, МПа (кгс/мм^2)	E, МПа (кгс/мм^2)
	$\frac{AC_1}{Ar_1}$,°C	$\frac{AC_3}{Ar_3}$,°C								
Ст 10	732 / 680	874 / 854	7,83	340 (34)	210 (21)	31	55	1370 (137)	—	198000 (19800)
Ст 15	735 / 685	863 / 840	7,82	360 (36)	230 (23)	29	55	1430 (143)	65 (6,5)	202000 (20200)
Ст 20	735 / 682	854 / 835	7,82	420 (42)	250 (25)	25	55	1560 (156)	55 (5,5)	200000 (20000)
Ст 25	735 / 685	850 / 835	7,86	460 (46)	280 (28)	23	50	1700 (170)	90 (9,0)	—
Ст 45	—	—	—	610 (61)	360 (36)	16	40	—	5	—
Ст 65Г	—	—	—	710 (71)	420 (42)	11	35	—	—	—
У10А	730 / 700	800 / 750	7,81	550-650 (55-65)	250-350 (25-35)	—	55÷65	1970 (197)	—	—
У12А	730 / 700	820 / 750	7,81	600-700 (60-70)	350-450 (35-45)	—	45÷55	2070 (207)	—	—

На рис. 2.14–2.31 показаны зависимости механических свойств сталей 11кп, 11ЮА и 18ЮА от степени деформации и диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$. В результате проведения авторами исследований с использованием активного планируемого эксперимента получены однофакторные и многофакторные модели характеристик механических свойств.

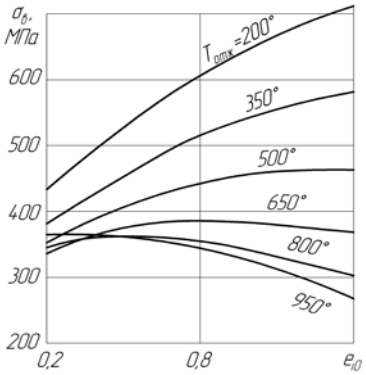


Рис. 2.14. Зависимость временного сопротивления $\sigma_в$ наклепанной стали 11КП от температуры последующего отжига $T_{отж}$,°С

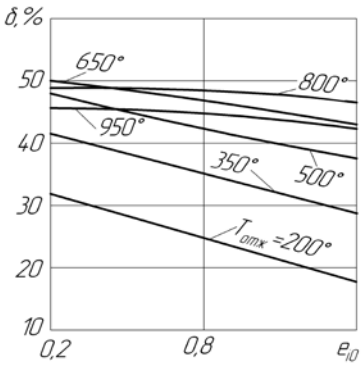


Рис. 2.15. Зависимость относительного удлинения δ наклепанной стали 11КП от температуры последующего отжига $T_{отж}$,°С

Однофакторные модели, учитывающие влияние степени деформации (e_i или ψ):

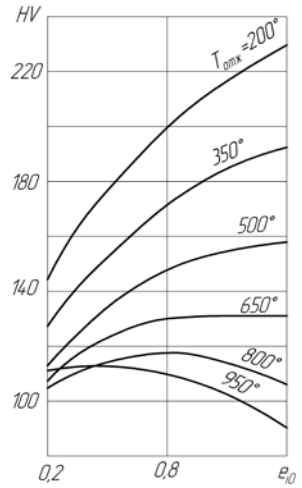


Рис. 2.16. Зависимость твердости HV наклепанной стали 11КП от температуры последующего отжига $T_{отж}$,°С

- для стали 11кп (e_i = 0…1,4)

$\sigma_в$ =32+49 e_i -19,2 e_i^2 , кгс/мм^2; HV =105+135 e_i -36,4 e_i^2 ; δ =2,8–3,9 ln e_i ; $\sigma_в/\sigma_{в0}$ =1+1,53 e_i -0,6 e_i^2 – в безразмерном виде; HV/HV_0 =1+1,29 e_i -0,35 e_i^2 ;

- для стали 11ЮА (ψ = 0…80 %)

$\sigma_в$ =38+0,61 ψ - 0,002ψ^2, кгс/мм^2; δ_1 = 45–1,33 ψ ψ = 0…20%); δ_2 =3,7exp 31,96/ ψ (ψ =20…80%); $\sigma_в/\sigma_{в0}$ =1+0,016 ψ -0,00005 ψ2 – в безразмерном виде;

- для стали 18 ЮА (e_i = 0…1,6)

$\sigma_в$ =48+45,7 e_i -15,6 e_i^2 , кгс/мм^2; HV=126+173,3 e_i -63,4 e_i^2 ; δ =2,1–2,6 ln e_i ; $\sigma_в/\sigma_{в0}$ =1,0+1,07 e_i -0,37 e_i^2 – в безразмерном виде, где $\sigma_{в0}$, HV_0 – свойства металла в отожженном состоянии.

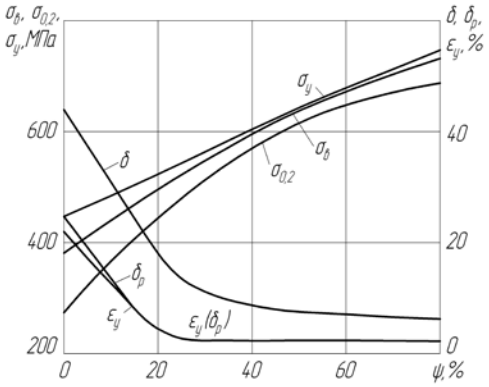


Рис. 2.17. Зависимость характеристик механических свойств стали 11ЮА от степени деформации

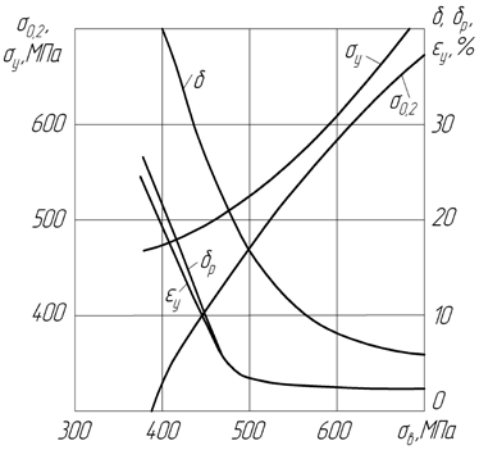


Рис. 2.18. Зависимость характеристик механических свойств ($\sigma_{0,2}$, σ_{iy}, δ, δ_p, ε_{iy}) стали 11ЮА от временного сопротивления ($\sigma_в$)

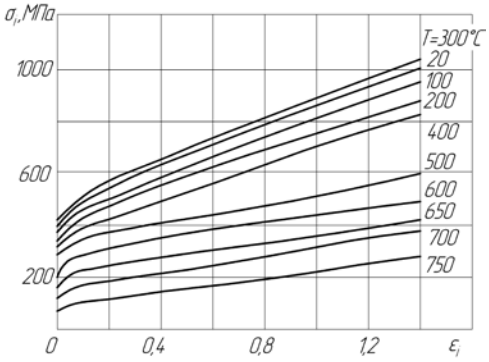


Рис. 2.19. Диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ для стали 18ЮА при различных температурах испытания

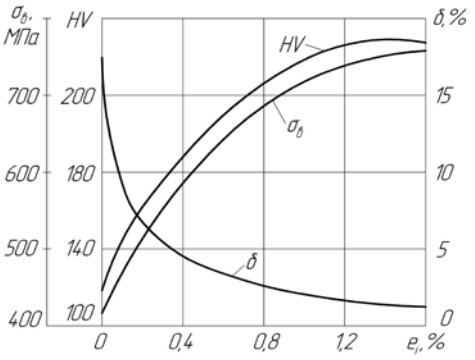


Рис. 2.20. Зависимость характеристик механических свойств стали 18ЮА от степени деформации e_i

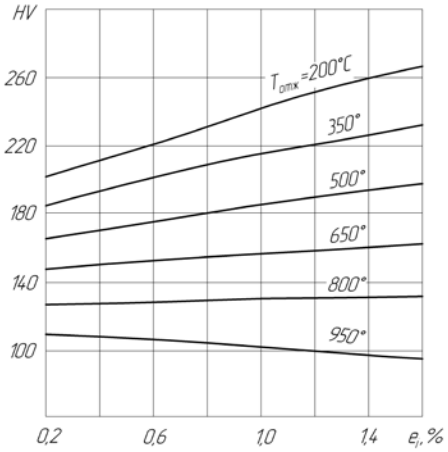


Рис. 2.21. Зависимость твердости HV стали 18ЮА от степени деформации e_i при различных температурах последующего отжига $T_{\text{отж}}$,°C

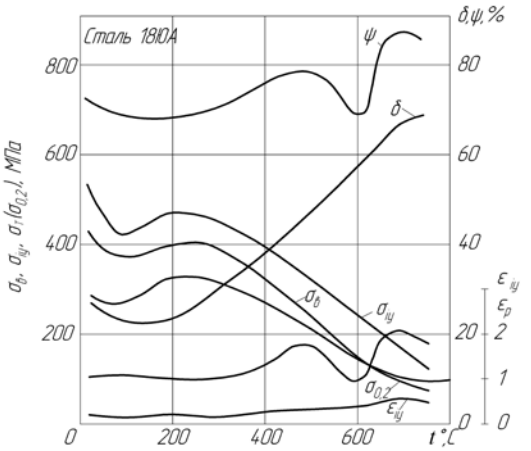


Рис. 2.22. Зависимость характеристик механических свойств стали 18ЮА от температуры процесса деформации

Многофакторные модели, учитывающие влияние степени деформации $e_i(\psi_i)$; температуры t и длительности τ последующего отжига:

для стали 11кп (e_i =0,2…1,2, ψ =20…80 %, $t = t_{\text{отж}}/100$ =2…9,5; τ =30…90 мин, $e_i = 1{,}15 \ln 1/(1-\psi)$)

$\sigma_{\text{в}} = 45 + 49{,}5\, e_i - 5{,}03\, t - 4{,}3\, e_i\, t - 0{,}56\, e_i\, \tau - 9{,}42\, e_i^2 + 0{,}44\, t^2$, кгс/мм^2;

$HV = 148 + 170\, e_i - 15{,}8\, t - 12{,}3\, e_i\, t - 3{,}62\, e_i\, \tau - 31{,}48\, e_i^2 + 1{,}21\, t^2$;

$\delta = 9{,}9 - 27{,}1\, e_i + 9{,}8\, t - 4{,}56\, \tau + 1{,}54\, e_i\, t + 1{,}9\, e_i^2 - 0{,}73\, t^2 + 0{,}28\, \tau^2$;

$\frac{\sigma_в}{\sigma_{в0}}$ =1,41+1,55 e_i -0,16 t–0,13 e_i t–0,0175 e_i τ -0,29 e_i^2 +0,014 t^2 – в безразмерном виде; $\frac{HV}{HV_0}$ =1,41+1,62 e_i -0,15 t–0,12 e_i t–0,034 e_i τ -0,30 e_i^2 +0,012 t^2 .

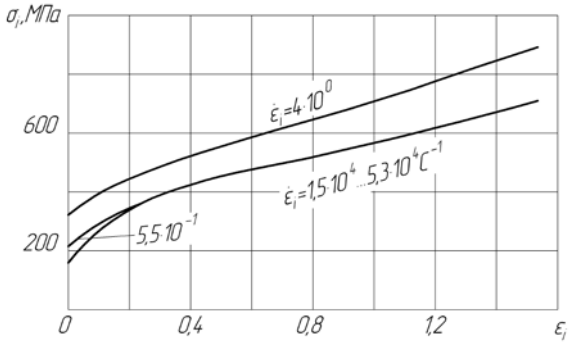
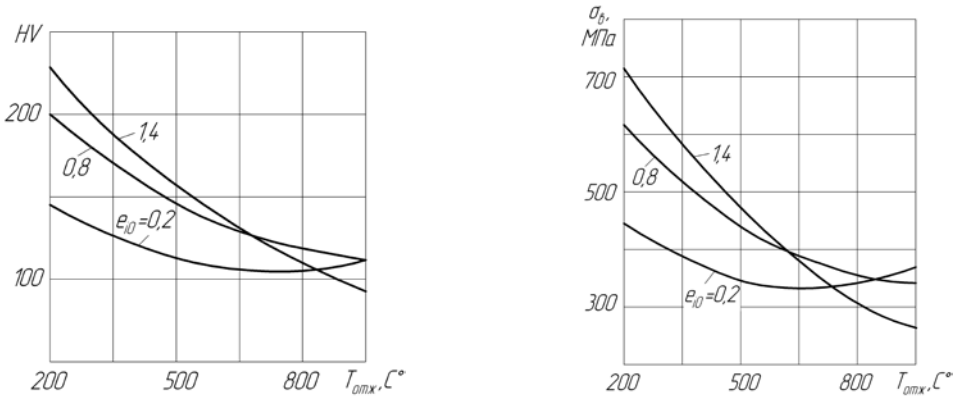


Рис. 2.23. Диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ для стали 11кп при различных скоростях деформации $\dot{\varepsilon}_i$



а *б*

Рис. 2.24. Влияние степени деформации e_i и температуры последующего отжига $T_{отж}$,°C на твердость HV (*а*) и временное сопротивление $\sigma_в$ (*б*) стали 11КП (длительность отжига 60 мин)

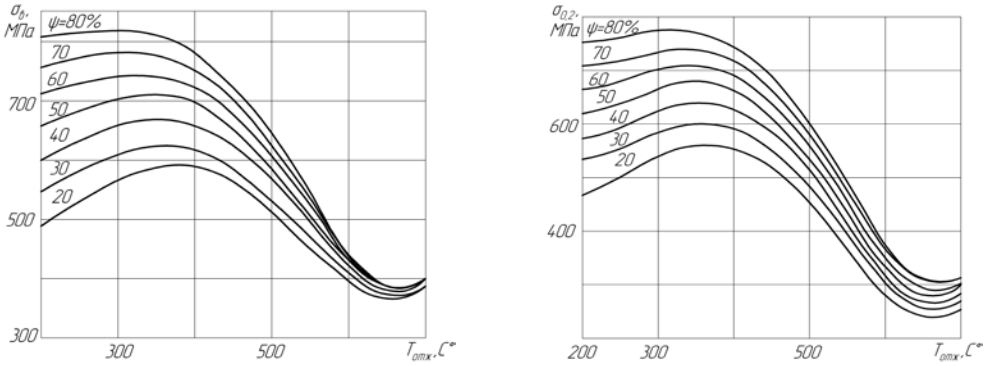
для стали 11ЮА (ψ =20…80 %, t = $t_{отж}$/100 = 2…7,0, τ =30…90 мин)

$\sigma_в$ =18,4+0,53 ψ +0,004 ψ τ -0,002 τ^2 +11,8 t^2 -3,32 t^3 +0,24 t^4 , кгс/мм^2 ;

$\frac{\sigma_в}{\sigma_{в0}}$ =0,48+0,014 ψ +1,05·10^{-4} ψτ -5,3 10^{-5} t^2 +0,31 t^2 -8,7· 10^{-2} τ^2 ·10^{-2} t^3 +

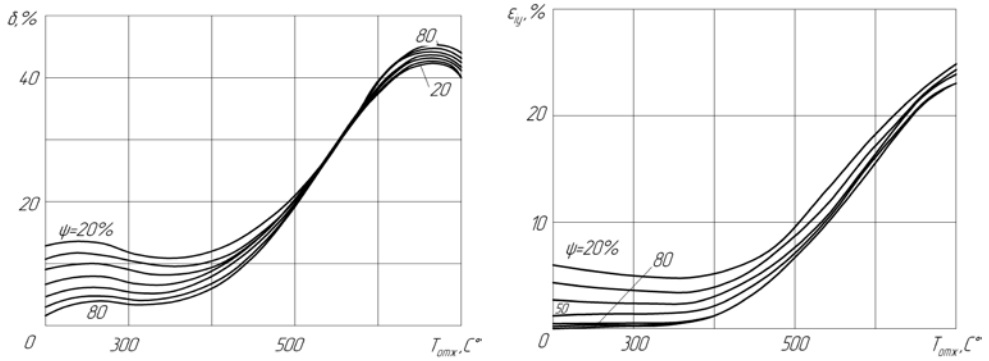
+6,3·10^{-3} t^4 – в безразмерном виде;

δ = 30–0,0045 ψτ +0,0487 ψτ +0,002τ^2 - 9,49 t^2 +2,8777 t^3 - 0,2162 t^4 ;



а *б*

Рис. 2.25. Зависимость характеристик прочности наклепанной стали 11ЮА от температуры последующего отжига: *а* – временное сопротивление $\sigma_в$, *б* – условный предел текучести δ



а *б*

Рис. 2.26. Зависимость характеристик пластичности наклепанной стали 11ЮА от температуры последующего отжига: *а* – относительного удлинения δ, *б* – предел до потери устойчивости деформации ε_{iy}

для стали 18ЮА (e_i =0,2…1,6; $t = t_{отж}/100$ = 2…9, τ = 30…90 мин)

$\sigma_в$ =59+49,9 e_i -6,1t+0,22 τ -3,04 e_i t-0,22 e_i τ -0,012 $t\tau$ -6,47 e_i^2 +0,38 t^2 , кгс/мм^2;

HV=222+96,3 e_i -13,2 t–0,41 τ -7,64 e_i t–0,59 e_i τ +0,043 $t\tau$ +0,005 τ^2 ;

δ =-4,5–13,6 e_i +6,1 t–0,09 τ +1,31 e_i t+0,14 e_i τ -0,27 t^2 ;

$\frac{\sigma_в}{\sigma_{в0}}$ =1,38+1,17 e_i -0,14t+5,2·10^{-3} τ -0,017 e_i t-5,2·10^{-3} $e_i\tau$ -2,8·10^{-4} $t\tau$ -

-0,15 e_i^2 +8,9·10^{-3} t^2 – в безразмерном виде;

$\frac{HV}{HV_0}$ =1,76+0,76 e_i -0,10t–3,3·10^{-3} τ -0,06 e_i t–4,6·10^{-3} $e_i\tau$ +3,4··10^{-4} $t\tau$ +4·10^{-5} t^2 .

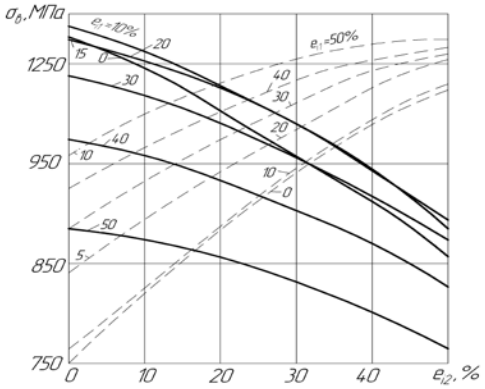
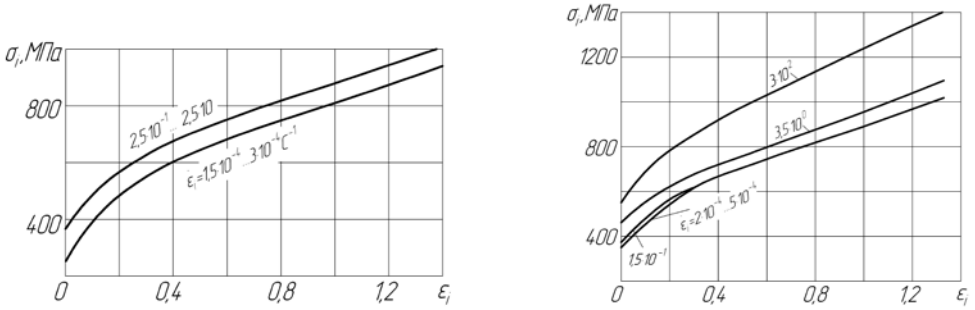
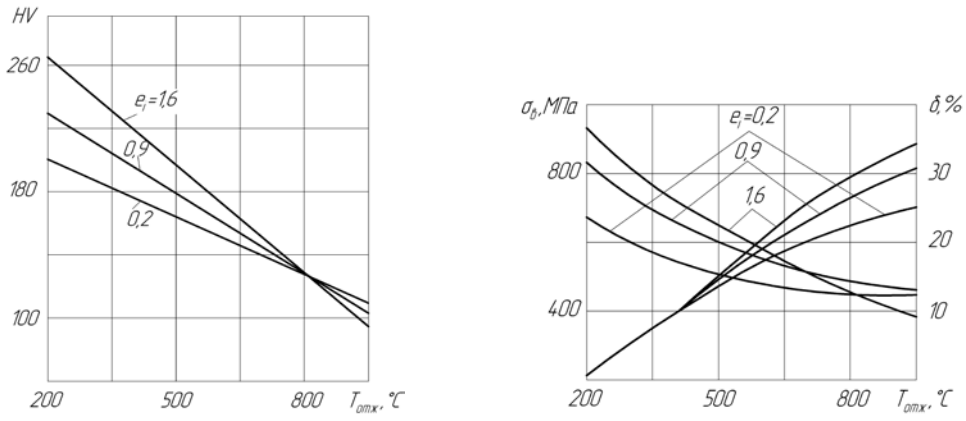


Рис. 2.27. Зависимость временного сопротивления $\sigma_в$ (– – –) и относительного удлинения δ (–) закаленной стали 18ЮА от величин степени деформации e_{i1} предшествующей закалке и следующей за ней e_{i2} $T_{зак} = 950°C$



а *б*

Рис. 2.28. Диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ для стали 18ЮА в состоянии поставки:
а – $S_0 = 1$ мм; *б* – $S_0 = 8{,}4$ мм



а *б*

Рис. 2.29. Зависимость твердости HV (*а*), временного сопротивления $\sigma_в$ и относительного удлинения δ (*б*) стали 18ЮА от степени деформации e_i и температуры последующего отжига $T_{отж}$,°C (длительность отжига 60 мин)

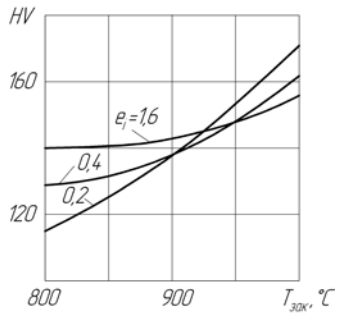
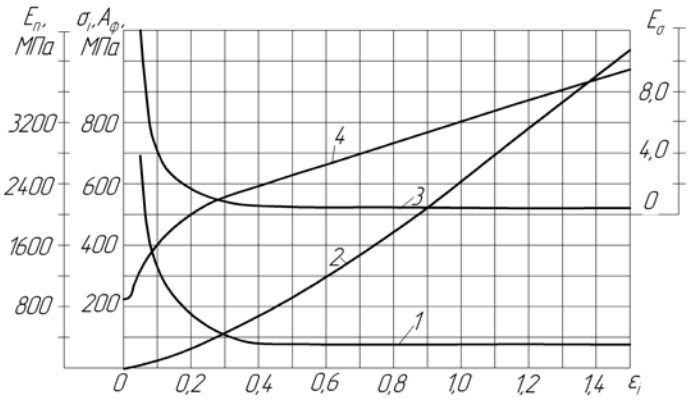
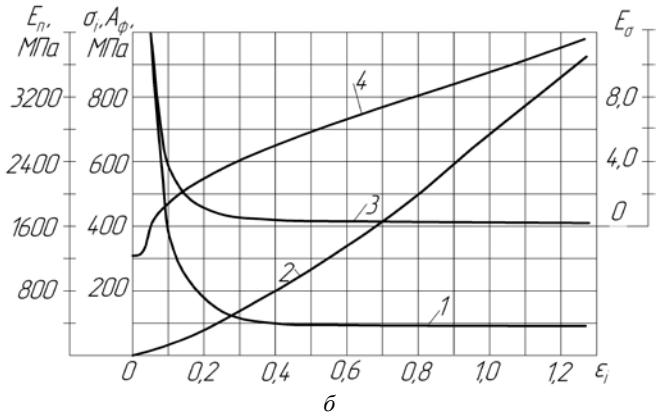


Рис. 2.30. Влияние температуры закалки на твердость предварительно наклепанной стали 18ЮА $T_{\text{отж}} = 700°C$



а



б

Рис. 2.31. Зависимость характеристик механических свойств стали 18ЮА от интенсивности деформации ε_i: *а* – $S_0 = 1$ мм; *б* – $S_0 = 8{,}4$ мм; *1* – абсолютный модуль пластичности (касательный модуль) $E_к = d\sigma_i / d\varepsilon_i$; *2* – удельная работа формоизменения $A_ф$; *3* – относительный модуль пластичности $E_\sigma = (1/\sigma_i)(d\sigma_i / d\varepsilon_i)$; интенсивность напряжения σ_i

В табл. 2.14 приведены механические свойства стали У12А при различных температурах процесса деформации [7].

Таблица 2.14

Механические свойства стали У12А

Температура, ˚С	Механические характеристики				
	$\sigma_в$, МПа	δ,%	ψ,%	$a_к$, МПа	*НВ*
20	600	24,0	40,6	1,25	156,0
600	135	47,4	77,5	4,08	77,0
700	72	54,0	77,3	21,81	28,3
800	69	34,4	49,8	24,7*	32,0
900	28	30,8	42,5	18,43*	16,0
1000	24	37,8	60,8	14,56*	13,3
1100	15	52,9	88,1	11,08*	9,8
1200	13	51,6	98,9	7,66*	9,8

* Образцы не разрушились, а согнулись.

Ниже даны диаграмма $\sigma_i - \varepsilon_i$ (рис. 2.32), эмпирические и графические зависимости характеристик механических свойств ($\sigma_{0,2}, \sigma_в, \delta$) от степени деформации $\varepsilon = \Delta h / h_0, \%$ при осадке (h_0 – начальная высота образца, Δh – величина осадки, рис. 2.33) для отожженных инструментальных углеродистых сталей У12, У12А и других углеродистых конструкционных и инструментальных сталей [8]:

1. Сталь У12:

$\sigma_{0,2} = 55 + 2{,}7\varepsilon^{0,76}, (\text{кгс}/\text{мм}^2)$;

$\sigma_в = 68 + 2{,}2\varepsilon^{0,77}, (\text{кгс}/\text{мм}^2)$;

$e_{дб} = 1{,}398 - 3{,}17\varepsilon + 2{,}9\varepsilon^2$.

2. Сталь У12А:

$\sigma_{0,2} = 62 + 0{,}76\varepsilon^{1,025}, (\text{кгс}/\text{мм}^2)$;

$e_{дб} = 1{,}423 - 3{,}01\varepsilon + 2{,}5\varepsilon^2$.

3. Углеродистые конструкционные и инструментальные стали (40, 45, У10, У12):

$\sigma_{0,2} = (\sigma_{0,2})_{исх} + 5{,}40\varepsilon^{0,60}, (\text{кгс}/\text{мм}^2)$;

$\sigma_в = (\sigma_в)_{исх} + 1{,}6\varepsilon^{0,76}, (\text{кгс}/\text{мм}^2)$ – для ст. 25…85;

$\sigma_в = (\sigma_в)_{исх} + 1{,}90\varepsilon^{0,70}, (\text{кгс}/\text{мм}^2)$ – инструментальные качественные стали (У8А, У9А, У10А, У12А);

$\sigma_в = 0{,}35HB$ – углеродистые инструментальные и легированные стали (интервалы значений: $\sigma_в = 40{,}0 \div 110{,}8\ (кгс/мм^2)$, $HB = 140{,}0 \div 300{,}0$);

$\sigma_в = 0{,}46HB - 22{,}0$ – углеродистые конструкционные стали (интервалы значений: $\sigma_в = 30{,}0 \div 130{,}0 (кгс/мм^2)$, $HB = 90{,}0 \div 330{,}0$).

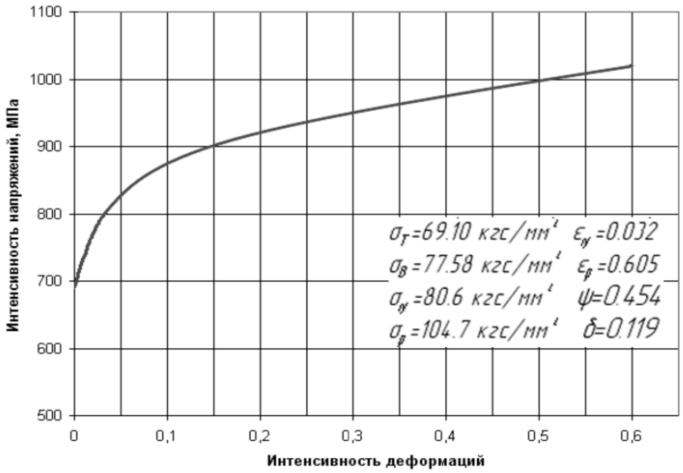


Рис. 2.32. Диаграмма «σ_i – ε_i» для стали У12А (в состоянии поставки)

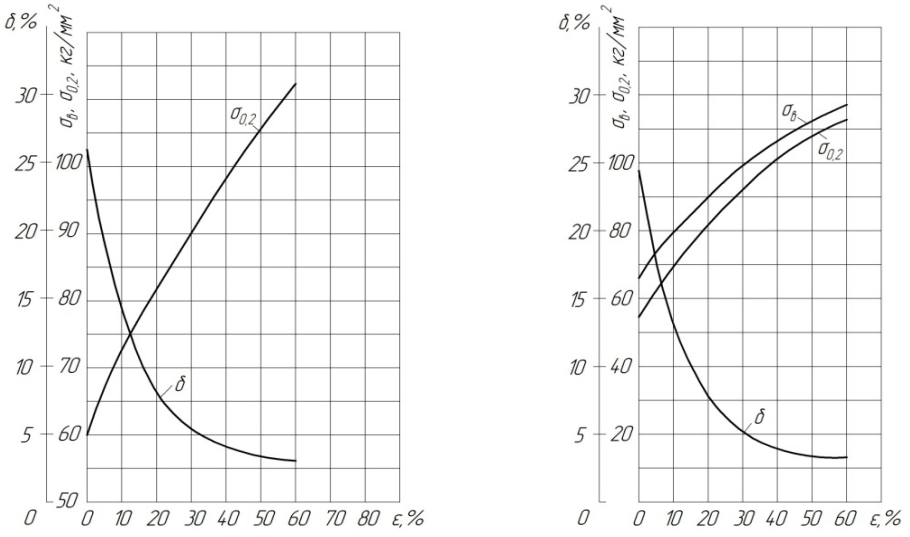


Рис. 2.33. Графические зависимости характеристик механических свойств ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_в$, δ) от степени деформации $\varepsilon = \Delta h / h_0, \%$ при осадке инструментальных углеродистых сталей У12 (*а*) и У12А (*б*)

2.4.2. Металлокерамические твердые сплавы

Для повышения бронепробиваемости бронебойные сердечники могут изготавливаться из металлокерамических твердых сплавов. Основу сплавов составляет порошкообразный карбид вольфрама с добавкой 4…6 % порошкообразного кобальта или никеля. Плотность сплава типа 1 составляет 14,8…15,0 г/см^3. Твердость бронебойных сердечников составляет 87-90 HRC. Указанные сплавы относятся к группе сплавов на основе монокарбида вольфрама WC.

В первом из них в качестве цементирующего вещества применяется кобальт, а в двух других – никель. Сплав №1 относится к малокобальтовым сплавам (от 2 до 8 %). Исходными веществами, входящими в состав сплавов WC-Co, являются монокарбид вольфрама WC и металлический кобальт. Микроструктура сплавов WC-Co в основном двухфазная, состоящая из кристаллов карбида вольфрама и участков цементирующей (кобальтовой) фазы. Цементирующая фаза состоит из кобальта, в котором растворены небольшие количества вольфрама и углерода. Размеры карбидных зерен в сплавах WC-Co в зависимости от их назначения колеблются в пределах 1…5 мкм. Участки цементирующей фазы, видимые под микроскопом, имеют обычно толщину 1…2 мкм. Размеры зерен кобальтовой фазы намного превышают размеры зерен карбида вольфрама.

Химический состав указанных сплавов дан в табл. 2.15, а механические свойства сплавов с различным содержанием кобальта – в табл. 2.16.

По данным В.Т. Трощенкова и В.Н. Руденко, твердый сплав с содержанием 6 % Co имеет следующие значения характеристик механических свойств: $\sigma_в$ = 1240 МПа (при растяжении), $\sigma_в$ = 4120 МПа (при сжатии), E = 6,75·10^{-6} МПа, $a_к$ = 0,87 кДж/м^2 (ненадрезанные образцы), $a_к$ = 0,08 кДж/м^2 (надрезанные образцы).

Таблица 2.15

Химический состав твердых сплавов, %

Номер сплава	W	C (общий)	C (свободный)	Ni	Co	Fe и другие примеси
1	86,7…87,3	Не менее 5,3	Не более 0,10	–	6,0…6,5	1,5
2	87,0…88,0	Не менее 5,2	0,10	6,0	–	1,5
3	76,2…87,0	5,4…6,0	0,10	3,5…4,5	–	1,2

Таблица 2.16

Механические свойства сплавов WC-Co при одноосном сжатии (по данным Г.С. Креймера)

Содержание кобальта, % (объемн. частях)	Условный предел текучести, МПа (кгс/мм^2)	Максимальная деформация до разрушения, % (при напряжении кгс/мм^2)	Предел прочности, МПа (кгс/мм^2)
6 (10,5)	2000 (200)	1,10 (337)	3550 (355)
15 (25)	1300 (130)	1,49 (270)	2900 (290)
25 (40)	890 (89)	4,35 (240)	2550 (255)
35 (50)	650 (65)	5,10 (200)	2250 (225)
50 (64,8)	460 (46)	6,86 (180)	2070 (207)

2.5. Биметаллы

Биметалл (от лат. bis – дважды металл) – это материал, состоящий из двух прочно соединенных слоев разнородных металлов или сплавов. Биметаллы применяют с целью экономии дорогостоящих и дефицитных металлов и (или) получения материала, обладающего сочетанием некоторых свойств исходных металлов.

В патронном производстве биметаллы (биметалл 1 и биметалл 3) разработаны в качестве заменителей дорогостоящих и дефицитных сплавов латуни (Л68 и Л70), в то же время они не уступают латуням по основным эксплуатационным требованиям (жесткости, прочности, устойчивости против коррозии, антифрикционным свойствам) и имеют относительно высокие технологические свойства (штампуемость, упрочняемость и некоторые другие свойства).

Изготовление биметаллов осуществляют плакированием, т.е. нанесением на поверхность стальных полос тонкого слоя томпака (латуни Л90) в процессе совместной горячей прокатки стальной заготовки и покрываемых ее с обеих сторон двух заготовок томпака (двусторонняя плакировка). В результате получают трехслойную полосу из двух сплавов. Толщина каждой томпаковой заготовки составляет 4…6 % от толщины стальной заготовки в исходном состоянии.

Биметалл 1 (ОСТ 3-6648-91) в виде полос изготавливают из стали марки 18кп с химическим составом по ГОСТ 1050 или стали марки 18ЮА с химическим составом по ГОСТ 803 и томпака марки Л90 по ГОСТ 15527.

Биметалл 3 (ОСТ 3-6649-91) в виде лент и полос изготавливают из стали марки 11кп с химическим составом по ГОСТ 1050 или стали 11ЮА по ГОСТ 803 и томпака марки Л90. Полосы из биметалла 1 поставляют в отожженном состоянии. Ленты и полосы из биметалла 3 поставляются в ото-

жженном или дрессированном состоянии. По соглашению с потребителем возможно изготовление полос и лент в нагартованном и полунагартованном состоянии по согласованным параметрам.

Отжиг полос и лент производят в печах с нейтральной атмосферой. Допускается выполнять отжиг в коробах без защитной атмосферы. Нормируемые стандартами механические свойства биметаллов приведены в табл. 2.17.

Таблица 2.17

Механические свойства биметаллов

Марка биметалла	Марка стального слоя биметалла	Временное сопротивление, $\sigma_в$, МПа (кгс/мм^2)	Относительное удлинение δ,% не менее
Биметалл 1	18кп	304…397 (31,0…40,5)	28,5
	18ЮА	323…431 (33,0…44,0)	30,0
Биметалл 3	11кп	265…363 (27,0…37,0)	27,0
	11ЮА	284…402 (29,0…41,0)	28,0

В табл. 2.18 и на рис. 2.34–2.40 приведены механические свойства биметалла 1 и 3 по результатам исследований авторов.

Таблица 2.18

Механические свойства биметаллов

Марка материала	$\sigma_т$	$\sigma_в$	σ_{ij}	S_K	ε_{iy}	ε_{ip}	ψ_y	ψ_p
	МПа (кгс/мм^2)							
Биметалл 1	249 (25,4)	379 (38,7)	475 (48,5)	830 (84,7)	0,28	1,44	0,23	0,76
Биметалл 3	245 (25,0)	359 (36,6)	464 (47,5)	–	0,26	1,55	0,27	0,79

Диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ аппроксимируются степенными функциями (размерность, кгс/мм^2):

$\sigma_i = 77\varepsilon_i^{0,33}$ – биметалл 1; $\sigma_i = 81\varepsilon_i^{0,39}$ – биметалл 3.

Математические модели характеристик механических свойств:

а) однофакторные для биметалла 1 (e_i = 0,2…1,6)

$\sigma_в = 37,7+47,3\,e_i - 16,3\,e_i^2$, кгс/мм^2; $HV = 124+90,3\,e_i - 18,9\,e_i^2$; $\delta = 0,8–5,1\ln e_i$;

$\frac{\sigma_в}{\sigma_{в0}} = 1+1,25\,e_i - 0,34\,e_i^2$ – в безразмерном виде; $\frac{HV}{HV_0} = 1+0,73\,e_i - 0,15\,e_i^2$;

б) однофакторные для биметалла 3 (e_i = 0…1,2)

$\sigma_в = 30,3+68,2\,e_i - 33,6\,e_i^2$, кгс/мм^2; $HV = 108+204\,e_i - 101,5\,e_i^2$;

$\delta = 2,0–4,4\ln e_i$; $\sigma_в/\sigma_{в0} = 1+2,25\,e_i - 1,11\,e_i^2$ – в безразмерном виде;

$HV/HV_0 = 1+1,9\,e_i - 0,94\,e_i^2$;

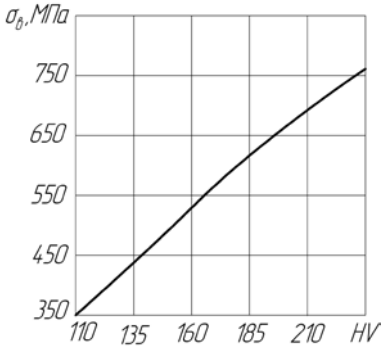


Рис. 2.34. Корреляционная зависимость $\sigma_в = f(HV)$ для биметалла 1

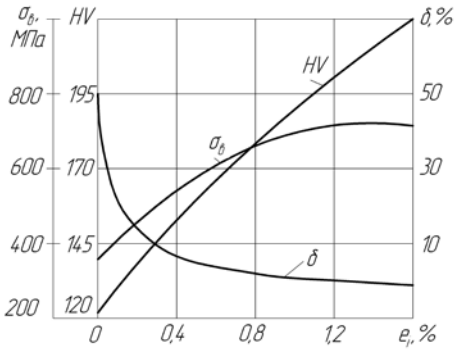


Рис. 2.35. Зависимость характеристик механических свойств биметалла 1 от степени деформации e_i

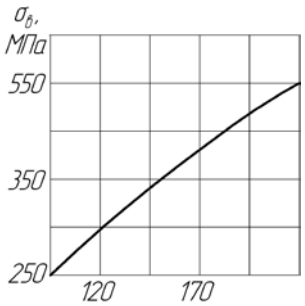


Рис. 2.36. Корреляционная зависимость $\sigma_в = f(HV)$ для биметалла 3

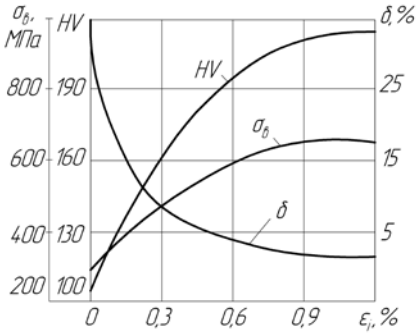


Рис. 2.37. Зависимость характеристик механических свойств биметалла 3 от степени деформации e_i

в) многофакторные для биметалла 1 (e_i =0,2…1,6, $t = t_{отж}/100$ = 2…9,5; τ = 30…90 мин)

$\sigma_в$ =54+45,4 e_i -7,9 t+0,18 τ -2,73 e_i t-0,23 e_i τ -5,78 e_i^2 +0,49 t^2, кгс/мм^2;

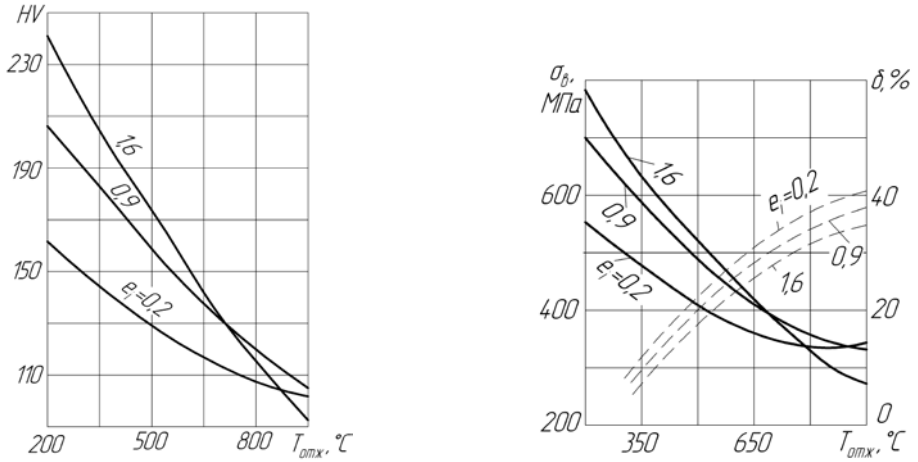
HV=157+131,5 e_i -11,7 t-8,33 e_i t-0,52 e_i τ -0,012 $t\tau$ -15,37 e_i^2 +0,56 t^2 +0,0028 τ^2;

$\frac{\sigma_в}{\sigma_{в0}}$ =1,43+1,20 e_i -0,21t+4,8·10^{-3} τ -7,2·10^{-2} e_i t-6,1·10^{-3} e_i τ -0,15 e_i^2 + 1,3·10^{-2} t^2

– в безразмерном виде;

$\frac{HV}{HV_0}$ =1,27+1,06 e_i -9,4·10^{-2} t-6,7·10^{-2} e_i t - 4,2·10^{-3} e_i τ - 9,7·10^{-5} $t\tau$ -0,12 e_i^2 +4,5·10^{-3} t^2 +

$+2{,}3\cdot10^{-5}\,\tau^2$;



а *б*

Рис. 2.38. Зависимость твердости HV (*а*), временного сопротивления $\sigma_в$ и относительного удлинения δ (*б*) биметалла 1 после деформации от температуры последующего отжига $T_{отж}$,°*C* (– $\sigma_в$, – – δ)

г) многофакторные для биметалла 3 (e_i =0,2…1,2, $t = t_{отж}/100$ = 2…9,5; τ =30…90 мин)

$\sigma_в = 43+45\,e_i - 5{,}1\,t + 0{,}19\,\tau - 3{,}37\,e_i\,t - 0{,}27\,e_i\,\tau - 0{,}004\,t\tau - 2{,}09\,e_i^2 + +0{,}29\,t^2$, кгс/мм^2;

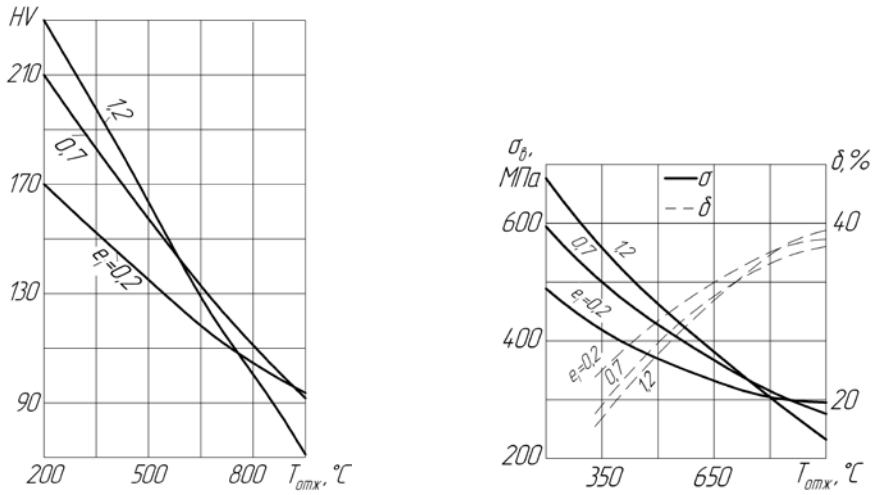
$HV = 119+185{,}5\,e_i - 12{,}9\,t + 1{,}26\,\tau - 11{,}12\,e_i\,t - 0{,}86\,e_i\,\tau - 36{,}002\,e_i^2 + 0{,}42\,t^2 - 0{,}006\,\tau^2$;

$\frac{\sigma_в}{\sigma_{в0}} = 1{,}42+1{,}49\,e_i - 0{,}17t + 6{,}3\cdot10^{-3}\,\tau - 0{,}11\,e_i\,t - 8{,}9\cdot10^{-3}\,e_i\,\tau - 1{,}32\cdot10^{-4}\,t\tau - 6{,}9\cdot10^{-2}\,e_i^2 +$

$+9{,}6\cdot10^{-3}\,t^2$ – в безразмерном виде;

$\frac{HV}{HV_0} = 1{,}10 + 1{,}72\,e_i - 0{,}12\,t + 1{,}17\cdot10^{-2}\,\tau - 0{,}10\,e_i\,t - 7{,}96\cdot10^{-3}\,e_i\,\tau - 0{,}33\,e_i^2 +$

$+3{,}9\cdot10^{-3}\,t^2 - 5{,}6\cdot10^{-3}\,\tau^2$.



а *б*

Рис. 2.39. Зависимость твердости HV (*а*), временного сопротивления $\sigma_в$ и относительного удлинения δ (*б*) биметалла 3 после деформации от температуры последующего отжига $T_{отж}$,°C

Стандартами регламентированы размерные ряды полос и лент по толщине и ширине.

Примеры условного обозначения полос и лент из биметаллов:

Полоса $\dfrac{2{,}1\times116\times750-2000\ \text{Биметалл 1 ОСТ 3-6648-91}}{18\ \text{ЮА ГОСТ803-81}}$;

Лента $\dfrac{1{,}37\times131\ \text{Биметалл 3 ОСТ 3-6649-91}}{11\ \text{ЮА ГОСТ803-81}}$.

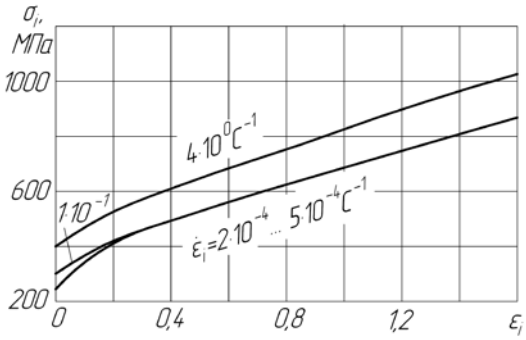


Рис. 2.40. Диаграммы $\sigma_i-\varepsilon_i$ при различных скоростях деформации $\dot{\varepsilon}_i$ для биметалла 3

2.6. Контроль качества исходного материала и штампованных полуфабрикатов

2.6.1. Методы контроля

Для получения патронов и его элементов высокого качества необходим тщательный контроль материала в соответствии с предъявляемыми к нему требованиями как в стадии, предшествующей запуску в производство, так и в процессе производства.

Отсутствие строгого контроля приводит к повышенному браку в процессе производства, повышенному отходу основных материалов и рабочего инструмента, повышенной себестоимости изготовления изделий и возможной остановке производства вследствие засорения потока заготовками, не обеспечивающими требуемых эксплуатационных свойств патронов.

В соответствии с предъявляемыми к материалам требованиями следует различать методы контроля эксплуатационных свойств и методы контроля технологических свойств.

Основными контролируемыми эксплуатационными свойствами материалов, применяемых для изготовления патронов и его элементов, являются: 1) прочностные свойства, обеспечивающие сопротивление разрушению и жесткость изделий в обращении и эксплуатации; 2) упругие свойства, обеспечивающие условия надежной экстракции элементов патрона; 3) пластические свойства, обеспечивающие условия обтюрации при выстреле и, в частности, условия врезания оболочки пули в нарезы канала ствола; 4) устойчивость против старения, коррозии и коррозионного растрескивания.

При этом указанные свойства определяются как химическим составом и физико-механическими свойствами материала исходных заготовок, так и состоянием поверхности заготовки, микро- и макроструктурой заготовки, наличием дефектов металлургического происхождения.

Следовательно, методы контроля на обеспечение эксплуатационных требований в стадии, предшествующей запуску материала в производство, должны включать: химический анализ состава материала, механические испытания, металлографический анализ макро- и микроструктуры, контроль наружных и внутренних дефектов металла исходной заготовки (дефектоскопию).

Контроль устойчивости против старения, коррозии и коррозионного растрескивания осуществляется, как правило, на завершающей стадии процесса производства, после получения готовых изделий.

Окончательный контроль эксплуатационных свойств материалов осуществляется методами натурных полигонных испытаний. Основными контроли-

руемыми технологическими свойствами материала являются штампуемость и способность по удержанию наносимых на его поверхность технологических и антикоррозионных покрытий, пригодность к термической обработке и некоторые другие свойства.

Штампуемость есть комплексное свойство, отражающее способность данного металла к пластическому формоизменению, без потери устойчивости и разрушения на определенной штамповочной операции и при определенных условиях пластической деформации (температуре, скорости деформации, виде напряженно-деформированного состояния, схеме напряженного состояния, условиях контактного трения). Важнейшими технологическими свойствами металлов при пластической деформации, влияющими на штампуемость материала, являются характеристики предельных *k*-состояний материала (k = 1, 2, 3, 4): предельные степени деформации – до начала текучести (e_{i1}), до потери устойчивости пластического формоизменения и локализации деформаций ($e_{i2} = e_{iy}$), предразрушения ($e_{i3} = e_{iH}$), до разрушения ($e_{i4} = e_{ip}$) – и отвечающие им характеристические значения сопротивления материала деформированию σ_{ik}; удельной работы формоизменения $A_{удk}$; безразмерных параметров деформационного упрочнения и степени использования запаса пластичности $\omega_{ik} = \left(e_{in}/e_{ip}\right)^a$.

Сложность определения технологических свойств металлов заключается в том, что каждая из перечисленных характеристик предельной деформации e_{ik} и в целом штампуемость материала зависит от металлографической структуры, механических свойств исходного металла, качества поверхности и точности размеров штампуемой заготовки; параметров, отражающих вид и условия протекания процесса штамповки во времени; конструктивно-технологических параметров, характеризующих технологичность конструкции штампуемой детали.

Так, например, пластическое формоизменение листового металла характеризуется большой неравномерностью полей напряжений и деформаций, что при наличии у листовых заготовок геометрических и структурных неоднородностей может привести к преждевременной локализации деформаций и возникновению сосредоточенного утонения, волнистости, накоплению трещин и другим нежелательным локальным явлениям. Эти локальные нарушения приводят к образованию опасных очагов деформации с пониженной несущей способностью и нарушению процесса формоизменения в целом: искажению формы изделия, разрушению металла и т.д. При оценке штампуемости возникают трудности, связанные с установлением локальных нарушений, оказывающих решающее влияние на течение процесса.

Понятие о предельной деформации прежде всего связано с представлением о достижении материалом заготовки определенного физического предель-

ного состояния, которое сопровождается его качественными необратимыми изменениями, а также качественными необратимыми изменениями самой деформируемой заготовки, например: потерей устойчивости при малых упругопластических деформациях; потерей устойчивости пластического деформирования в виде локализации деформации с последующим разрушением при действии растягивающих напряжений; потерей устойчивости пластического формоизменения при сжатии с образованием гофр; разрушением заготовок без потери пластической устойчивости; недопустимым пружинением и некоторыми другими. Для ряда процессов объемной штамповки понятие предельной деформации связывают также с достижением предельного состояния материала не заготовки, а рабочего штампового инструмента. В технологических расчетах и реализуемых процессах нельзя непосредственно использовать предельную степень деформации $e_{i\text{пр}}$, как заведомо приводящую к нарушению качества деталей, а следует принимать несколько меньшее по сравнению с $e_{i\text{пр}}$ значение, заведомо исключающее переход металла в предельное состояние, соответствующее стадии процесса штамповки и условиям деформации, и именуемое допустимой степенью деформации $e_{i\text{доп}}$, т.е.

$$e_{i\text{доп}} / e_{i\text{пр}} < 1$$

или

$$e_{i\text{доп}} = C\, e_{i\text{пр}}, \qquad (2.1)$$

где $C < 1$ – коэффициент запаса пластичности (устойчивости).

В соотношении (2.1) коэффициент C является неопределенной величиной. Любое заданное значение коэффициента не гарантирует 100%-ного исключения технологического отказа, так как важнейшим свойством реальных процессов является рассеяние их характеристик. Причиной рассеяния значений технологических характеристик является то, что на результаты их измерения и формирования оказывают влияние большое число полностью или частично контролируемых и неконтролируемых факторов, которые можно разделить на две группы.

К первой группе относятся факторы, связанные с технологией и свойствами исходного металла: химический состав шихты; режимы выплавки, прокатки и термообработки металла (температура, скорость нагрева и охлаждения, продолжительность выдержки); условия штамповки (температура, скорость процесса, условия трения, характер нагружения); точность изготовления рабочего инструмента и др.

Во вторую группу входят факторы, связанные с условиями испытаний образцов и заготовок при определении предельных деформаций экспериментальными методами: режимы изготовления и подготовки заготовок к испытаниям, режимы испытаний; погрешность измерений и расчетов исследуемых

величин.

Из этого следует, что технологические характеристики, в том числе предельные деформации, по своей природе не являются детерминированными величинами, точные численные значения которых определены однозначно. Но они не являются и произвольными величинами. Имея достаточный объем данных, используя теорию вероятности и методы математической статистики, можно решить задачу оценки предельной и допустимой степени деформации в процессах штамповки с учетом случайной природы этих величин. Исследования подтверждают предположение, что распределение предельных деформаций в процессах вытяжки, обжима, выдавливания не противоречит нормальному закону. Это позволяет сформулировать статистические критерии оценки предельной и допустимой степени деформации в следующем виде:

$$e_{i\,\text{пр}} = \bar{e}_{i\,\text{пр}} \pm 3\bar{S}_{ei} = \bar{e}_{i\,\text{пр}}(1 \pm 3V_{ei})\,; \qquad (2.2\text{а})$$

$$e_{i\,\text{доп}} = \bar{e}_{i\,\text{пр}} - 3\bar{S}_{ei} = \bar{e}_{i\,\text{пр}}(1 - 3V_{ei}), \qquad (2.2\text{б})$$

где $\bar{e}_{i\,\text{пр}}$ – среднее арифметическое выборки; $\bar{S}_{ei}$ – среднее квадратическое отклонение выборки; $V_{ei} = \bar{S}_{ei} \big/ \bar{e}_{i\,\text{пр}}$ – коэффициент вариации.

Путем сравнения соотношений (2.2) и (2.1) устанавливаем, что коэффициент запаса принимает значение

$$C = 1 - 3V_{ei}.$$

В соответствии с выполненными авторами статистическими исследованиями можно принимать, например, следующие числовые значения коэффициента вариации в выражении (2.2):

- для предельной до разрушения деформации $e_{i\text{пр}}$ при вытяжке с утонением – 0,03…0,04;
- для предельной до потери устойчивости пластического формоизменения деформации $e_{i\text{у}}$ при обжиме – 0,03…0,05;
- для предельной до разрушения деформации $e_{i\text{пр}}$ при поперечном выдавливании – 0,08…0,10.

Сложность определения технологических свойств оправдывает практику выявления пригодности материалов в производстве методом натурных испытаний, т.е. на самих технологических процессах. В соответствии с рассмотренными выше положениями методы контроля технологических свойств материалов исходных заготовок и полуфабрикатов включают в себя химический анализ, металлографический анализ, дефектоскопию, механические испытания, технологические испытания и пробы, натурные испытания.

2.6.2. Контроль качества металла по химическому составу, макро- и микроструктуре

Химический состав исходного материала существенно влияет на нормальный ход технологического процесса и качество готового изделия. Любые колебания в количественном соотношении той или иной составляющей, выходящие за пределы установленных технологических условий на приемку материала, недопустимы.

Химический состав сталей, применяемых для изготовления элементов патрона, должен соответствовать нормам, предусмотренным соответствующими государственными и отраслевыми стандартами. В состав сталей, кроме углерода, марганца, небольших количеств кремния, серы, фосфора и газов, входят также и другие добавочные примеси, такие как хром, никель, медь и алюминий.

Каждый из элементов оказывает определенное влияние на свойства металла.

Оптимальное содержание углерода в штампуемых сталях 0,05…0,22%. Более низкое содержание (<0,05%) нежелательно из-за опасности газонасыщения и увеличения склонности к росту зерна. Более высокое содержание углерода увеличивает сопротивление деформированию и ухудшает пластические свойства стали.

Из газов наиболее вредное влияние на сталь оказывают азот и кислород. Оба эти элемента влияют на старение стали и образуют неметаллические включения (оксиды, нитриды), снижающие пластические свойства. Азот значительно повышает предел текучести и прочности стали. Допустимое содержание обоих элементов нормами обычно не оговаривается.

Кипящие стали для глубокой вытяжки не должны иметь азота больше 0,006%, а спокойные – не больше 0,008.

Газы в стали ухудшают ее вытяжные свойства из-за образования пузырей и усадочных раковин, которые являются причиной образования трещин при холодной штамповке.

В последнее время установлено, что марганец увеличивает способность к глубокой вытяжке.

Для достижения высоких вытяжных свойств содержание марганца в стали должно быть в пределах 0,30…0,50 %. Если марганца содержится меньше, чем 0,30 %, то на боковых кромках горячекатаных полос образуются трещины. Частицы металла от “рваных” кромок могут попадать на полосу, закатываться и ухудшать ее поверхность. Не следует превышать также верхнюю границу (0,50 %) содержания марганца, иначе ухудшаются условия кипения стали в изложнице и повышается сопротивление деформированию материала.

Оптимальное содержание кремния в стали 0,06…0,13 %, так как сталь должна обладать не только высокой способностью к штампуемости, но и определенной жесткостью.

Сера и фосфор являются нежелательными и вредными элементами в стали, и их содержание должно быть сведено к минимуму. Фосфор увеличивает сопротивление деформированию и ухудшает способность стали к вытяжке. Допустимое содержание фосфора не должно превышать 0,03 %. Сера в стали обычно находится в виде сернистых включений, которые ухудшают пластические свойства материала, содержание серы должно быть не больше 0,035 %.

Сопровождающие примеси, к которым относятся медь, никель, хром, в основном упрочняют материал, поэтому их содержание не должно превышать норм, указанных в ГОСТах на материалы: хрома – не более 0,15 %, никеля – не более 0,25 %, меди – не более 0,2 %.

В сталях 18ЮА, 11ЮА в качестве стабилизатора применяют алюминий, который связывает азот и, кроме того, является сильным раскислителем, его содержание в стали находится в пределах 0,02…0,07 %, что повышает ее пластические свойства.

Химический состав медно-цинковых сплавов (латуни) должен соответствовать нормам, указанным в ГОСТах. Наиболее целесообразной маркой латуни, как установлено ранее, для гильз является сплав с содержанием цинка от 33 до 28 %.

Помимо цинка, на качество латуни влияет ряд неизбежных примесей, наиболее вредными из них являются:

1) висмут, сообщающий хрупкость латуни в холодном и горячем состоянии, его содержание – не более 0,002 %;

2) сурьма, снижающая пластичность в холодном состоянии, ее содержание – не более 0,002 %;

3) железо, снижающее пластичность и сообщающее хрупкость, его содержание – не более 0,1 %;

4) сера, сообщающая пузыристость при отливке, ее содержание – не более 0,002 %.

На заводе-изготовителе для контрольной проверки химического состава прокатанных готовых стальных и биметаллических полос отбирают контрольные полосы.

При сифонной разливке стали отбирают по одной полосе, изготовленные из слитков первого и последнего сифонов, при разливке сверху отбирают полосы, изготовленные из первого и последнего слитков, а для повторных проверок – полосы, изготовленные из второго и предпоследнего слитков по ходу разливки. Контрольные полосы берут после удаления головной части слитка. Для стали марок 11ЮА и 18ЮА дополнительно отбирают контрольные полосы из нижней части слитка. Пробы для химического анализа вырезают из контрольных полос по одной пробе от полосы. Для стали марок 18кп и 18ЮА при сифонной разливке отбирают две пробы. Для определения химического состава стали биметаллических полос отбирают две полосы каждой постав-

ляемой плавки. Химический анализ проб, взятых из контрольных полос на заводе-потребителе, проводят путем анализа стружки на углерод, марганец, серу, фосфор, кремний, никель, хром и медь. В сталях 11ЮА и 18ЮА проверяют содержание алюминия. Содержание углерода и серы определяют методом сжигания, фосфора – калориметрическим методом, остальные элементы – спектральным методом. Если при химическом анализе будет обнаружено несоответствие какого-либо элемента нормам, указанным в ГОСТе, то химический анализ проводится на удвоенном количестве образцов данной плавки. Если при повторном испытании будет иметь место несоответствие элементов, то вся партия бракуется.

Одним из важнейших методов контроля материала является металлографический анализ, который заключается в определении микро- и макроструктуры. Микроструктура исходного материала оказывает значительное влияние на механические свойства, качество поверхности материала и качество штамповки. Металлографический анализ дает возможность получить сведения о величине и форме зерен перлита и феррита, о количестве, форме и распределении цементита и неметаллических включений в сталях. По результатам металлографического анализа можно судить об эксплуатационных и технологических свойствах материала. Микроструктура стали в состоянии поставки должна состоять из феррита и мелкозернистого перлита. Менее благоприятным будет пластинчатый перлит или крупные выделения структурно-свобод-ного цементита по границам зерен.

Присутствие в структуре пластинчатого перлита увеличивает прочность и ухудшает пластические свойства стали. Наиболее существенно ухудшают пластичность крупные образования хрупкого цементита на границах зерен, где при штамповке начинают появляться трещины. Для горячекатаных полос стали 18ЮА (ГОСТ 15883-70) микроструктура по перлиту должна соответствовать шкале 2 (ГОСТ 5640–68), допустимые баллы 0-5 ряда А и 0–3 ряда Б; по величине ферритного зерна – шкале (ГОСТ 5639-65), допустимые баллы 7-10 .

Микроструктура исходного материала должна содержать минимальное количество неметаллических включений, которые способствуют возникновению трещин при штамповке. Строчные оксиды и сульфиды не должны превышать 3-го балла по шкалам ГОСТ 1778–70.

Для холоднокатаных сталей марки 18ЮА микроструктура металла должна удовлетворять следующим нормам: величина зерна феррита по ГОСТ 5639-82, 7 – 9 балл, допускается наличие зерна балла 6 (не более 50%) и зерно удлиненной формы; форма перлита по ГОСТ; ряд А – до балла 3 включительно, ряд Б – до балла 3 включительно. Неравномерность распределения перлита в поверхностных слоях полос не должна превышать двух смежных баллов. Глубина поверхностного обезуглероживания должна быть не более 0,06 мм.

Микроструктура латуней должна быть мелкозернистой, в противном случае поверхность колпачков получается шероховатой. Крупнозернистая латунь может самопроизвольно растрескивается даже в отожженном состоянии.

Допустимыми для глубокой вытяжки являются латуни со средним диаметром зерна 0,045…0,090 мм.

На заводе-изготовителе для проверки микроструктуры холоднокатаных и горячекатаных полос на перлит и ферритное зерно отбирают три полосы, взятые из верхней и нижней зон каждой садки термической обработки, для проверки у потребителя отбирают три любые полосы из партии. Из каждой полосы вырезают по одному темплету в направлении вдоль прокатки и изготавливают микрошлифы. Для проверки неметаллических включений отбирают шесть любых полос от партии. Испытанию не подвергают боковые кромки полосы шириной 40 мм, которые перед отбором отдельных образцов обрезают.

Для определения микроструктуры полос из качественной и высококачественной стали вырезают два темплета от плавки весом не более 100 т и четыре темплета от плавки весом более 100 т; для проверки микроструктуры и неметаллических включений биметаллических полос вырезают по два темплета от двух полос каждого отжига поставляемой плавки. Определение неметаллических включений стального слоя полос производят на полированных шлифах при увеличении ×10 0. Место вырезки образцов для проверки неметаллических включений должно находиться от кромок на расстоянии не менее чем на 1/3 ширины полосы. Оценку микроструктуры стального слоя полос по форме перлита производят при увеличении ×400, оценку полосчатости микроструктуры – при увеличении ×100.

На заводе-изготовителе макроструктура стали проверяется при плавочном контроле каждой плавки на полноту удаления усадочной раковины и рыхлости, а также на отсутствие расслоений. На заводе-потребителе макроструктура определяется по эталонам, согласованным с заводом-изготовителем.

Исследование макроструктуры позволяет обнаружить в металле волокнистость, усадочные раковины, рыхлости, пустоты, трещины, шлаковые включения, а также установить наличие разрывов и начавшихся трещин.

2.6.3. Контроль качества исходного материала и полуфабрикатов на наличие дефектов и размерам

При изготовлении листового проката встречаются следующие дефекты: внутренние дефекты полос и лент (раковины, подкорковые пузыри, заворот корки, внутренние продольные и поперечные трещины, расслоения, пористость, плены, неметаллические включения), наружные дефекты (царапины,

трещины, волосовины, серповидность, волнистость, вкатанная металлическая крошка, раковины, рябизна, цвета побежалости, неплотности приварки томпака при применении биметалла, надрывы по кромке полосы, окисления, отслоение части металла).

Рассмотрим характеристику и причины появления различных часто встречающихся дефектов металлургического производства:

- усадочные раковины – местные углубления, образующиеся на поверхности полосы или ленты, в результате вскрытия мелких пустот (или аналогичные углубления при вдавливании в металл окалины, налипшей к валкам правильной машины);
- подкорковые пузыри – различной величины и формы вздутия на поверхности листа и полосы, они образуются из не заварившихся в процессе горячей прокатки пузырей;
- заворот корки – следствие относительно медленной и холодной разливки металла, обычно сопровождается газовыми пузырями;
- волосовины – мелкие трещины на поверхности металла различной протяжности и глубины, вытянутые вдоль прокатки, появляющиеся в результате вскрытия и вытягивания в процессе прокатки подкорковых пузырей и неметаллических включений;
- плены – тонкие, чешуйчатые, окисленные пластинки металла, отслаивающиеся от поверхности полосы или листа;
- внутренние продольные и поперечные трещины – результат неравномерного или быстрого нагрева и перегрева металла; причиной образования трещины может служить пониженная пластичность металла.

Все эти дефекты порождают брак в процессе производства. Весьма опасным дефектом, особенно для стальных и биметаллических полос, являются царапины на их поверхности. Царапины – одна из основных причин, вызывающих появление трещин по корпусу гильзы, демонтаж пуль.

Поверхность металла не должна иметь общего и частичного окисления, рисок, надрывов по кромке полосы. Окисленная поверхность снижает стойкость рабочего инструмента. Неправильная геометрическая форма, например винтообразные полосы, полосы с косообрезанными концами (косина среза не должна быть больше 10 мм) и полосы с надрывами по боковой кромке, приводят к нарушению нормальной работы механизмов подачи и просечкам, что дает некачественный колпачок, понижает стойкость сверточного, вытяжного инструмента.

Использование металла с расслоениями порождает брак в процессе производства, обнаруживаемый иногда только в момент стрельбы, поломку инструмента, оборудования.

На рис. 2.41 показаны различные виды брака при изготовлении гильз вследствие расслоения исходного материала. На рис. 2.41,*а* и *б* показан брак вследствие расслоения металла при свертке в колпачке; в одном случае полу-

чился кольцевой надрыв, что привело к изгибу и поломке пуансона, в другом случае – обрыв части колпачка и поломка пуансона.

На рис. 2.41,*в* показан отрыв (пробивка) дна. В процессе свертки колпачка происходит сдвиг одной части металла относительно другой. Более опасны случаи, когда расслоение оказывается возможным выявить не на первичных операциях, а только при стрельбе.

а *б* *в*

Рис. 2.41. Виды брака вследствие расслоения при свертке из плоской листовой заготовки: *а* – кольцевой надрыв на боковой поверхности; *б* – обрыв части стенки колпачка; *в* – отрыв дна колпачка

Не менее опасными дефектами являются плены и свищи. Примеры брака вследствие попадания в производство металла с этими дефектами показаны на рис. 2.42. Плены на наружной и внутренней поверхностях колпачка опасны, так как если своевременно не удалить колпачки и из них изготовить гильзы, то при стрельбе в зоне плены происходит прорыв, выпучивание металла, а иногда и отрыв части гильзы.

Большим недостатком биметаллических полос являются неплотности приварки томпака и надрывы. Если при осмотре, особенно гильз, не будет обнаружено нарушение плакированного слоя, то может произойти разрушение гильз или тугое экстрактирование.

В табл. 2.19 приведен в качестве примера процент брака по металльным дефектам Климовского штамповочного завода на патрон в целом, показывающий значительное влияние качества исходного металла на качество готовой продукции.

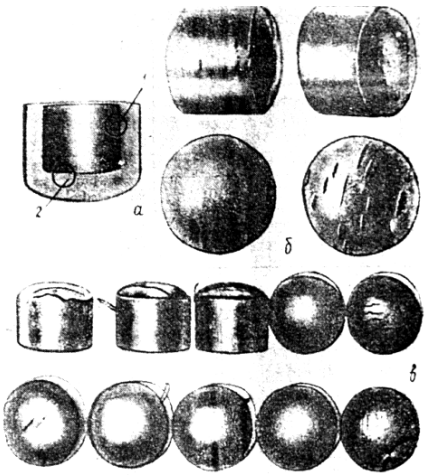


Рис. 2.42. Вид брака после свертки по пленам и свищам: *а* – плены на внутренней поверхности; *б* – плены на наружной поверхности; *в* – отслоение части металла

Таблица 2.19

Брак в % по металльным дефектам Климовского штамповочного завода при изготовлении патронов

Вид брака	Цех №1				Цех №2			
	1967 г.	1968 г.	1969 г.	1970 г.	1967 г.	1968 г.	1969 г.	1970 г.
Трещины	0,1	0,09	0,12	0,21	0,18	0,18	1,06	0,36
Плены	—	—	—	—	0,74	0,41	0,27	0,23
Складки	0,27	0,31	0,17	0,18	1,21	0,68	0,65	0,57
Царапины	0,30	0,34	0,14	0,30	0,44	0,16	0,16	0,19
Отпечатки	0,25	0,17	0,17	0,125	—	0,06	0,10	0,07
Оголение	0,33	0,35	0,49	0,43	—	0,01	0,08	—
Итого по заводу	2,74	2,39	2,6	3,07	4,6	2,97	3,6	2,68

На заводах-потребителях производится 100%-ный осмотр всех полос партии визуальным методом, т.е. осмотр поверхности невооруженным глазом. Наружная поверхность полос должна быть чистой, ровной и гладкой. На поверхности полос не допускаются раковины, плены, трещины, грубая рябизна, глубокие царапины, надрывы и рванины на боковых кромках, неплотная приварка томпака для биметаллических полос.

На поверхности полос допускаются мелкие риски, легкие царапины механического происхождения, чистые от окислов и неметаллических включений глубиной не более 0,4 мм, слабые отпечатки в виде сетки от разгара валков, незначительные заусенцы, мелкие уколы, покоробленность, цвета побежалости и легкий зажог плакирующего слоя, определяемые при помощи эталонов, согласованных между изготовителем и потребителем полос.

Указанные дефекты устраняются зачисткой, глубина которой не должна выводить полосу за границы минусового предельного отклонения по толщине.

Применяемый для контроля наружных дефектов полос визуальный метод контроля поверхности имеет ряд существенных недостатков:

- невозможность оценки глубины дефектов;
- низкая производительность контроля;
- невозможность обнаружения подповерхностных дефектов и затруднительность выявления поверхностных дефектов с микроскопическим раскрытием.

В настоящее время стремление повысить надежность контроля и улучшить условия труда контролера привели к разработке более совершенных методов визуального контроля. К подобным методам относятся люминесцентная и цветная дефектоскопия, а также флуоресцентно-магнитный метод.

Для контроля внутренних дефектов в настоящее время широко применяются, например, на заводах – изготовителях труб – импульсные ультразвуковые эхо-дефектоскопы.

Для контроля полуфабрикатов на патронно-гильзовых заводах известны следующие методы контроля:

- адаптерный метод для выявления продольных трещин на последних вытяжках;
- оптический метод для контроля всех видов дефектов на поверхности изделий;
- феррозондовый метод для контроля внутренних дефектов: раковин, пузырей;
- токовихревой метод для контроля наружных дефектов;
- электромагнитный метод и некоторые другие.

Наружному осмотру и проверке размеров подвергают 100 % полос партии. Для обмера полос по ширине пользуются скобой, а для обмера толщины – скобой или специальным микрометром. При обмере толщины полос следует обращать внимание на колебания размеров в пределах одной полосы, так как это приводит к повышенной разностенности при свертке и вытяжке. Серповидность оценивается по величине стрелы изгиба полосы и не должна превышать размеры, нормированные стандартом.

Длину полос обычно не контролируют, так как завод-поставщик обязан поставлять полосы длиной от 750 до 2000 мм, более длинные полосы неудобны в производстве, а более короткие увеличивают расход металла и снижают производительность при вырубке вследствие снижения коэффициента использования пресса.

Прутки для сердечников обычных и бронебойных пуль осматривают по наружному виду и обмеряют по диаметру, проверяют правильность геометрической формы поперечного сечения.

На поверхности прутков не должно быть трещин, закатов, плен, волосовин, а в изломе – пустот, пузырей, трещин, так как эти дефекты увеличивают брак при термообработке, понижают боевые качества сердечников, а также затрудняют монтаж пуль и являются одной из причин ухудшения кучности и демонтажа пуль на полете.

2.6.4. Механические испытания

В патронном производстве в основном применяются известные и стандартизованные методы испытания на растяжение плоских и цилиндрических образцов, изготовленных вырезкой из заготовок (полуфабрикатов) и готовых деталей, и на твердость самих заготовок (полуфабрикатов) и готовых деталей. Испытание на растяжение наиболее полно удовлетворяет условию получения линейной схемы напряженного состояния. В то же время известно, что даже в самых сложных случаях деформирования заготовок разрушение происходит при наличии растягивающих напряжений. Испытание на растяжение не сложно по исполнению и обеспечивает получение максимально возможного числа характеристик механических свойств.

Кроме того, широкое применение в патронном производстве тонколистового материала исключает возможность применения таких методов механических испытаний, как испытание на сжатие и кручение. Малые размеры полуфабрикатов и готовых изделий в большинстве случаев исключают возможность применения для оценки их свойств обычного метода испытания на растяжение плоских образцов, изготовленных из полуфабрикатов и деталей. В этом случае важное значение приобретают методы испытания на растяжение кольцевых образцов и методы испытания на твердость.

Ограниченное применение имеет метод испытания на ударный изгиб специальных образцов, изготовленных из заготовок и полуфабрикатов (деталей) для определения ударной вязкости при обычных и пониженных температурах.

Механические свойства, определяемые при испытании, характеризуют качество исходного металла и его пригодность для эксплуатации металлических элементов патрона и делят на три группы:

1) характеристики сопротивления деформированию;

2) характеристики пластичности;

3) обобщенные характеристики механических свойств – функции сопротивления деформированию и степени деформации.

Основные характеристики механических свойств, определяемые при испытаниях на растяжение, ударный изгиб и твердость, приведены в табл. 2.20.

Методики механических испытаний регламентированы стандартами. В результате испытаний устанавливают соответствие значений заданных характеристик механических свойств требованиям стандартов (государственных, отраслевых) на технические условия поставки и приемки.

Таблица 2.20

Характеристики механических свойств

Характеристики предельного сопротивления упругой и пластической деформации		Характеристики пластичности		Обобщенные показатели механических свойств	
Название	Расчетная формула	Название	Расчетная формула	Название	Расчетная формула
1	2	3	4	5	6
1. Испытание на растяжение					
Предел упругости	$\sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0}$	Относительное удлинение после разрыва	$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0}$	Модуль нормальной упругости	$E = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}$
Предел пропорциональности	$\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{F_0}$	Относительное равномерное удлинение	$\delta_{\text{у}} = \frac{l_k - l_{0\text{р}}}{l_{0\text{р}}}$	Модуль пластичности (интенсивность упрочнения)	$E_k = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i}$

Продолжение табл. 2.20

1	2	3	4	5	6
Предел текучести (физический)	$\sigma_т = \frac{P_т}{F_0}$	Относительное сужение площади поперечного сечения после разрыва	$\psi_k = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100\%$	Удельная работа деформации	$A_{уд1} = \int_0^{\varepsilon_i} \sigma_i d\varepsilon_i$
Предел текучести (условный)	$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}$	Относительное равномерное сужение площади поперечного сечения	$\psi_y = \frac{F_0 - F_y}{F_0} 100\%$	Удельная работа равномерной деформации	$A_{уд_y} = \int_0^{\varepsilon_{iy}} \sigma_i d\varepsilon_i$
Временное сопротивление (предел прочности)	$\sigma_в = \frac{P_{max}}{F_0}$	Интенсивность деформации	$\varepsilon_i = \ln \frac{l_i}{l_0}$	Полная работа деформации	$A = \int_{l_0}^{l} P dl_i$
Интенсивность напряжений в момент начала образования шейки на образце	$\sigma_{iy} = \frac{P_{max}}{F_y}$	Интенсивность деформации в момент образования шейки	$\varepsilon_{iy} = \ln \frac{l_y}{l_0} = 2 \ln \frac{d_0}{d_y}$	Относительный модуль пластичности	$E_{\sigma_i} = \frac{1}{\sigma_i} \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i}$
Интенсивность напряжений	$\sigma_i = \frac{P_i}{F_i}$	Интенсивность деформации в момент разрушения	$\varepsilon_{ip} = 2 \ln \frac{d_0}{d_k}$	–	–
Сопротивление разрушению	$S_K = \frac{P_K}{F_K}$		–	–	–

2. Ударный изгиб – определение ударной вязкости

Ударная вязкость (при испытании хрупких материалов)	$\alpha_н = \frac{A_н}{F}$	Угол загиба	$\alpha°$	Работа разрушения	$A_н = Ml(\cos\beta - \cos\alpha)$
	–	Угол излома	$180° - \alpha°$	Ударная вязкость	$\alpha_н = \frac{A_н}{F}$
	–	Стрела прогиба образца без надреза	–	–	–

Окончание табл. 2.20

1	2	3	4	5	6
Ударная вязкость (при испытании хрупких материалов)		Относительное удлинение растянутой стороны образца без надреза	$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100\%$	–	–
		Истинная относительная деформация растянутой стороны образца без надреза	$\varepsilon_i = \ln \frac{l_k}{l_0}$	–	–
		Ударная вязкость	$\alpha_н = \frac{A_н}{F}$	–	–
1. Измерение твердости					
Твердость по Бринелю	$HB = \frac{P}{S_в}$	Диаметр отпечатка	d	–	–
Твердость по отпечатку конуса	$HR = \frac{P}{F}$	Площадь отпечатка	$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$	–	–
Твердость по отпечатку конуса	$HR = \frac{P}{S_к}$	Поверхность отпечатка	$S_в = \frac{D^2}{2} - \frac{\pi d^2}{2} \sqrt{D^2 - d^2}$	–	–
Твердость по отпечатку пирамиды (по Викерсу)	$HV = \frac{P}{S_п}$	Глубина отпечатка	$h = \frac{D}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - \left(d^1\right)^2}$	–	–
Микро–твердость	$H = \frac{P}{S_п}$	Диагональ отпечатка	d	–	–
Твердость по Роквеллу	HRB HRC HRA	Поверхность отпечатка	$S_к = \frac{4 \sin \frac{\psi}{2}}{\pi \cdot d^2} = 1{,}1$ $S_п = \frac{2 \sin \frac{\psi}{2}}{\pi \cdot d^2}$	–	–

П р и м е ч а н и я. 1) $P_{0,05}$ – нагрузка, вызывающая удлинение образца на 0,05% его длины, равной базе тензометра; $P_{пц}$ – нагрузка, при которой тангенс угла, образованного касательной к кривой деформации, $P - \Delta l$ и осью деформации, увеличивается в полтора раза на линейном упругом участке; 2) $P_т$ – постоянная нагрузка, при которой возникает пластическая деформация образца; 3) $P_{0,2}$ – нагрузка, вызывающая удлинение, равное 0,2%; 4) P_{max} – максимальная нагрузка; 5) P_i – нагрузка в любой момент деформации; 6) l_0, d_0 – расчетные длина и диаметр образца; 7) $l_{0р}$ – начальная длина участка образца, на котором определяется равномерное от-

носительное удлинение; 8) l_{kp} – конечная длина участка образца, на котором определяется равномерное относительное удлинение после разрыва; 9) l_y, d_y – расчетные длина и диаметр образца в момент начала образования шейки; 10 l_k, d_k – расчетные длина и диаметр образца после разрыва; 11) F_0, F_y, F_k, F_i – площадь поперечного сечения образца до испытания, в момент начала образования шейки, после разрыва и в любой момент деформации; 12) M – масса маятника; 13) l – длина маятника; 14) α и β – углы подъема маятника до и после излома образца; 15) F – площадь поперечного сечения образца в месте надреза; 16) P – усилие вдавливания; 17) D – диаметр шарика; 18) d – диаметр отпечатка; 19) ψ – угол заострения конуса (90° или 120°) или пирамиды (136°).

Характеристиками предельного сопротивления упругой и малой упруго – пластической деформации служат пределы упругости ($\sigma_{0,05}$), пропорциональности ($\sigma_{пц}$) и текучести ($\sigma_т, \sigma_{0,2}$).

Для оценки сопротивления деформированию при пластических деформациях целесообразно применять показатели так называемого истинного сопротивления деформированию, определяемые по результатам испытания на растяжение (интенсивность напряжений σ_i, в том числе интенсивность напряжений в конце устойчивой, равномерной деформации σ_{iy}, интенсивность напряжений в момент разрушения σ_{ip}).

Наиболее полно механические свойства металлов и сплавов характеризуются диаграммами, кривыми упрочнения, построенными в координатах «интенсивность напряжений–интенсивность деформаций» $\sigma_i - \varepsilon_i$. Такого вида диаграммы могут применяться как для анализа, так и для расчета различных процессов штамповки. По кривым упрочнения $\sigma_i - \varepsilon_i$ могут быть определены для различных степеней деформации параметры $\sigma_i, A_{уд_i}, E_{ki}, E_{\sigma_i}$.

Ударные испытания надрезанных образцов можно применять для косвенной оценки сопротивления материалов деформированию. Только при испытании хрупких материалов ударная вязкость может характеризовать прочностные свойства деформируемого металла.

Показатели твердости, полученные при определенных условиях, могут использоваться для определения числовых значений временного сопротивления, например, по эмпирическим соотношениям следующего вида:

$$\sigma_в = C_1 HB; \quad \sigma_в = C_2 HV,$$

где C_1, C_2 – значения коэффициентов, устанавливаемых опытным путем.

По известным экспериментальным данным можно принять $C_1 = 0{,}36$ – для малоуглеродистых сталей после прокатки, нормализации (отжига), $C_1 = 0{,}35$ – для ненаклепанной латуни Л68.

Метод Бринелля применяется для контроля толстолистовых, а метод Виккерса – тонколистовых материалов.

Следует указать и на возможность применения метода твердости для определения интенсивности напряжений σ_i и деформаций ε_i, а в некоторых случаях и в целом напряженно-деформированного состояния заготовки.

В основе указанного метода принято положение о существовании функциональной связи между твердостью *HV*, степенью деформации e_i и интенсивностью напряженного состояния σ_i (рис. 2.43). Этот метод позволяет установить неравномерность распределения степеней деформации и механических свойств по сечению дна полуфабрикатов и готовых деталей как при проведении исследовательских работ, так и при анализе причин брака и дефектов в заводской практике. Изготовление темплетов и измерение твердости в интересующих точках, а также определение параметров σ_i и ε_i по имеющимся тарировочным графикам $\sigma_i - HV - e_i$ не представляется сложным. Определение степени деформации e_i может быть достаточно надежным при равенстве твердости исходных образцов, применяемых для построения тарировочного графика $\sigma_i - HV - e_i$, и твердости заготовки (полуфабриката), поступающей на штамповочную операцию, при высокой точности измерения твердости и хорошем качестве поверхности темплета (полуфабриката).

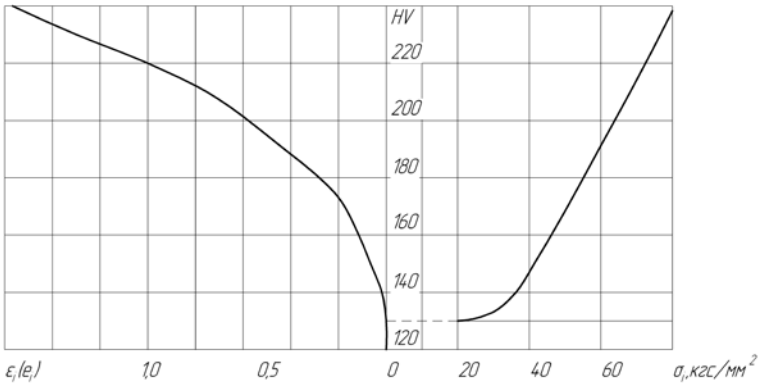


Рис. 2.43. Тарировочный график $\sigma_i - HV - \varepsilon_i$ для малоуглеродистой стали

Рассмотренные методы позволяют измерять макротвердость металла, определяемую сопротивлением пластическому деформированию столь большого объема, при котором не сказываются различия в действительной твердости его отдельных микрообъемов. Для измерения твердости материала в его микроскопически малых объемах применяются методы измерения микротвердости. Эти методы позволяют проводить тонкий анализ физико-механических

свойств в локальных объемах и при малых толщинах заготовок. Метод более трудоемок и требует высокой квалификации оператора, и специальной подготовки поверхности контролируемого образца.

Непосредственная оценка штампуемости листового материала по стандартизованным характеристикам механических свойств, определяемых при испытании на растяжение (сжатие, кручение) и твердость, не всегда объективна.

Анализ применяемых стандартов на листовой прокат свидетельствует об отсутствии единообразия в методах и критериях оценки штампуемости.

Так, например, ГОСТ 9045–80 наиболее полно характеризует свойства стали по следующим критериям: $\sigma_т(\sigma_{0,2}), \sigma_в, \delta_4$, *HRB*, глубине сферической лунки по Эриксену IE; ГОСТ 16523–70 для самой высокой группы 5 по штампуемости $-\sigma_в, \delta_0$, IE; ГОСТ 5582–75 $\sigma_в, \sigma_т, \delta_5$; ГОСТ 11268–76 – $\sigma_в, \delta_5$ и δ_{10}; ГОСТ 17066–80 – $\sigma_в, \delta_{10}, \sigma_т$ и т.д.

Поэтому в научно-технической литературе и производственной практике часто применяют комплексные показатели для оценки штампуемости материалов, рассчитываемые по некоторым характеристикам механических свойств. Так, для оценки штампуемости листовых материалов в процессах с реализацией плоской схемы напряженного состояния в зоне очага деформации при наличии растягивающих напряжений (в одном или двух главных направлениях) наиболее часто применяют следующие критерии:

- отношение предела текучести к временному сопротивлению $\sigma_{0,2} / \sigma_в$;
- коэффициент деформационного упрочнения *n* в уравнении степенного вида аппроксимирующего диаграмму

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^{\,n}; \qquad (2.3)$$

- коэффициент анизотропии свойств листового материала $R = \varepsilon_в / \varepsilon_S$ – коэффициент нормальной анизотропии ($\varepsilon_в, \varepsilon_S$ – деформации в направлении ширины и толщины образца)

$$r = R / (1+R); \qquad (2.4)$$

- коэффициент поперечной деформации;
- средний коэффициент анизотропии $R_{ср} = 0{,}25\ (R_0 + 2R_{45} + R_{90})$, где R_0, R_{45}, R_{90} – коэффициент анизотропии в различных направлениях относительно направления прокатки;
- удельная работа формоизменения на стадии устойчивого пластического деформирования, определяемая по соотношению

$$A_{2уд} = \sigma_{iy} \frac{n}{1+n} \qquad (2.5)$$

или без учета анизотропии свойств

$$A_{2уд} = \sigma_в (2{,}72)^n \frac{n}{1+n}, \qquad (2.6)$$

$$A_{2уд} = 1{,}2247\frac{\sqrt{1+R}}{2+R}\sigma_{iy}\frac{n}{1+n}; \qquad (2.7)$$

с учетом анизотропии свойств

$$A_{2уд} = 1{,}2247\frac{\sqrt{1+R}}{2+R}\sigma_{B}(2{,}72)^{n}\frac{n}{1+n}; \qquad (2.8)$$

- показатель

$$Б = 6{,}89 + 0{,}036\sigma_{т(0,2)} + 1{,}62R - 0{,}075A + 12{,}62n, \qquad (2.9)$$

где $A = \dfrac{\varepsilon(B_{\max} - B_{\min})}{B_0}$ – степень неравномерности деформации, определяемая по ТУ 14–105–322–76; показатель (ТУ 14–15–110–81):

$$F_A = -0{,}017\sigma_{т} + 0{,}032\delta_{25} + 0{,}875R + 4{,}8n - 0{,}12A + 7{,}601, \qquad (2.10)$$

δ_{25} – полное относительное удлинение (коэффициенты *R* и *n* определяют при растяжении образца на 10 или 17 %);

- твердость *HB*, *HV*, *HRB*.

Предел текучести $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление $\sigma_{в}$, коэффициент деформационного упрочнения *n*, коэффициент анизотропии *R* и *r* определяют по результатам испытания на растяжение, регламентированного ГОСТ 11701–84 и специальными методиками. Коэффициент *n* определяют из следующих соотношений:

$$n = \varepsilon_{iy} = \ln F_0/F_y = \ln l_y/l_0 \qquad (2.11)$$

или

$$n = \ln(1 + \delta_{р}), \qquad (2.12)$$

где $\delta_{р} = (l_y - l_0)/l_0$ – относительное равномерное удлинение.

Числовое значение *n* равно тангенсу угла наклона кривой упрочнения $\sigma_i - \varepsilon_i$, аппроксимированной прямой линией в логарифмических координатах $\lg\sigma_i - \lg\varepsilon_i$.

Между показателями $\sigma_{0,2}/\sigma_{в}$ и *n* должна существовать корреляционная связь, так как оба показателя по существу характеризуют одно и то же свойство металла. В работах А.Ю. Аверкиева [9] на основе статистической обработки результатов испытаний целого ряда углеродистых и других сталей получено соотношение

$$\frac{\sigma_{0,2}(\sigma_{т})}{\sigma_{в}} = 1{,}005 - 1{,}53n, \qquad (2.13)$$

откуда

$$n = 0{,}65\left(1{,}005 - \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{в}}\right). \qquad (2.14)$$

Анализ результатов исследований и производственная практика свидетельствует о значительном влиянии показателей $\sigma_{0,2}/\sigma_{т}$, n, R, $A_{2уд}$ на штампуемость материалов.

На участках листовой заготовки, на которые действуют растягивающие напряжения, увеличение n (или уменьшение $\sigma_{0,2}/\sigma_{т}$) способствует росту предельной до потери устойчивости деформации e_{iy} и более равномерному распределению деформации, повышает способность металла к формоизменению. На сжато-растянутых участках заготовки с увеличением n возрастает устойчивость против складкообразования. На этих же участках при $R > 1$ листовой материал лучше сопротивляется утонению в опасных зонах, что позволяет вести вытяжку с большими допустимыми степенями деформации. Вместе с тем увеличение R приводит к нарушению осевой симметрии деформирования, появлению окружной разнотолщинности стенок штампуемой детали и волнистости ее кромок. Последнее требует применения операций обрезки и сопровождается увеличением отхода металла.

Листовой металл с показателями упрочнения $n \geq 0{,}25$, $\sigma_{0,2}/\sigma_{в} \leq 0{,}7$ и коэффициентом анизотропии $R_0 \geq 1{,}5$ способствует повышению штампуемости при вытяжке, в том числе увеличению устойчивости формы. На штампуемость материалов также влияют абсолютные значения каждой из характеристик $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_{в}$ в отдельности. С увеличением $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_{в}$ возрастают контактные напряжения. При росте контактных напряжений в результате выдавливания происходит нарушение смазочной пленки, возможно схватывание (налипание) металла, появление задиров. При этом стойкость рабочего инструмента снижается. Указанные явления наблюдаются при вытяжке деталей из листового проката, имеющего $\sigma_{в} \geq 500$ МПа.

Интегральной характеристикой механических свойств служит удельная работа формоизменения $A_{2уд}$. С ростом этого показателя штампуемость материала, например пригодность к вытяжке, повышается.

В результате статистической обработки экспериментальных данных Ю.А. Аверкиевым получены эмпирические формулы для определения предельных коэффициентов вытяжки $m_{в}$ и отбортовки $m_{от}$ в зависимости от $A_{2уд}$:

$$(m_{в})_{пр} = \frac{C_{в}}{A_{2уд}} C_A; \qquad (2.15)$$

$$\left(m_{\text{от}}\right)_{\text{пр}} = C_{\text{о}} + \frac{C_{\text{от}}}{A_{2\text{уд}}}, \qquad (2.16)$$

где $C_{\text{А}}, C_{\text{в}}, C_{\text{о}}, C_{\text{от}}$ – эмпирические коэффициенты (табл. 2.21).

Т а б л и ц а 2.21

Эмпирические коэффициенты расчетных формул (2.15), (2.16)

Вид операции	Относительная толщина заготовки, $\frac{S_0}{D_0}100\%$	$C_{\text{в}}$	$C_{\text{А}}$	$C_{\text{о}}$	$C_{\text{от}}$
Вытяжка	0,06-0,2	0,8169	0,0994	—	—
	0,2-0,5	0,7663	0,0887	—	—
	0,5-1,0	0,7248	0,0811	—	—
	1,0-1,5	0,6980	0,0768	—	—
	1,5-2,0	0,6491	0,0662	—	—
Отбортовка	3,0	—	—	0,3796	20,2304
	4,0	—	—	0,3477	19,9620
	5,0	—	—	0,3090	20,8150
	10-30	—	—	0,2948	19,5235

В табл. 2.22 приведены рекомендуемые рядом исследователей уровни выделенных показателей по категориям групп сложности вытяжки, которые могут служить ориентиром при оценке штампуемости материалов.

Т а б л и ц а 2.22

Уровни показателей штампуемости материалов

Показатель	Категория сложности вытяжки						
	ВОСВ	ОСВ	СВ	ВГ	Г	Н	БВ
$\sigma_{\text{т}}/\sigma_{\text{в}}$	< 0,52	0,56-0,52	0,60-0,56	0,67-0,60	0,70-0,67	0,75-0,70	> 0,75
n	> 0,32	0,29-0,32	0,26-0,29	0,22-0,26	0,20-0,22	0,15-0,20	< 0,15
$A_{2\text{уд}}$, МПа	≥ 70	60	50	40	30	20	< 20
Б	7-9	5-7	3-5	1-3	—	—	—
F_A	8	7	5	3	—	—	—
$m_{\text{пр}}$	0,47-0,48	0,49-0,50	0,51-0,52	0,53-0,54	0,55-0,56	—	—

2.6.5. Технологические и натурные испытания материалов

Технологические испытания – метод оценки штампуемости металла путем моделирования его исходного структурного и напряженно-деформированного состояния на формоизменяющей штамповочной операции. Согласно данному определению любой разрабатываемый метод технологического испытания должен удовлетворять основным условиям геометрического и физико-механического подобия моделируемого им процесса. Учитывая ограни-

ченные цели технологических испытаний (оценка предельных деформаций и построение математических моделей этих характеристик), целесообразно при разработке методов технологических испытаний и их реализации обеспечивать принцип локального подобия.

Локальное подобие, с учетом общих принципов моделирования, сводится к следующим положениям.

1. Очаг пластической деформации при технологическом испытании должен быть геометрически подобен очагу пластической деформации на всех или отдельных стадиях моделируемого процесса штамповки.

2. Физико-механические явления, возникающие в очаге пластической деформации при технологическом испытании и в моделируемом процессе, должны иметь одинаковую природу, т.е. должны описываться одинаковыми дифференциальными (интегральными, интегродифференциальными) уравнениями.

3. Безразмерные начальные и граничные значения параметров должны быть равными.

Как следует из приведенных положений, геометрическое подобие является обязательным условием для реализации технологических испытаний. В результате формоизменения образца (заготовки) происходит непрерывное изменение его геометрии, обусловленное возникающими локальными деформациями (перемещениями) – линейными и угловыми.

Очевидно, что геометрическое подобие очага пластической деформации при технологическом испытании будет соблюдено на соответствующих стадиях формоизменения, если будут соблюдены условия подобия деформированного состояния, т.е.

$$\left(\varepsilon_{ij}\right)_{\text{ти}} = \left(\varepsilon_{ij}\right)_{\text{шт}}; \qquad (2.17\text{а})$$

$$\left(\nu_{\varepsilon}\right)_{\text{ти}} = \left(\nu_{\varepsilon}\right)_{\text{шт}}, \qquad (2.17\text{б})$$

где ε_{ij} – обобщенное обозначение линейных и угловых деформаций; ν_{ε} – характеристика вида деформации; “ти”, “шт” – индекс для технологического испытания и моделируемого процесса штамповки соответственно.

На деформированное состояние формоизменяемого тела в каждой его точке с координатами *x, y, z* влияют следующие факторы: исходная геометрия формоизменяемого тела и внешняя граница очага деформации, задаваемые в виде линейных ($l, l', l'', ..., l^{(i)}$) и угловых величин; граничные условия, которые могут быть заданны или в напряжениях $\left(\tau_K\right)$, или в перемещениях $\left(u_K\right)$, или смешанным образом; уровень (интенсивность) локальной деформации (ε_i), который при заданных нагрузках и граничных условиях зависит от свойств материала и его реологического поведения:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i(\omega_{i\Sigma}, e_{ip}, \alpha),$$

где $\omega_{i\Sigma} = \omega_{i0} + \omega_{ii}$ – суммарная, накопленная поврежденность.

На основе известных теоретических и экспериментальных исследований можно записать

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}\left(\frac{y}{l}, \frac{u_K}{l}, \frac{\sigma_K}{\sigma_{i1}}, \frac{R_a}{l}, f, \frac{\upsilon \cdot \eta}{\sigma_{i1}}, \frac{E_{\text{ин}}}{\sigma_{i1}}\right), \qquad (2.18)$$

где y – обобщенное обозначение декартовых координат (x, y, z); l – масштаб подобия.

Признаки и условия геометрического подобия очага пластической деформации имеют следующий общий вид:

$$\left(\frac{x}{l}\right)_{\text{ти}} = \left(\frac{x}{l}\right)_{\text{шт}}; \quad \left(\frac{y}{l}\right)_{\text{ти}}\left(\frac{y}{l}\right)_{\text{шт}}; \quad \left(\frac{z}{l}\right)_{\text{ти}}\left(\frac{z}{l}\right)_{\text{шт}}.$$

Из этих условий следует, что критерии геометрического подобия, выраженные через безразмерные отношения координат сходственных точек, будут также равны:

$$\left(\frac{x}{y}\right)_{\text{ти}} = \left(\frac{x}{y}\right)_{\text{шт}}; \quad \left(\frac{x}{z}\right)_{\text{ти}}\left(\frac{x}{z}\right)_{\text{шт}}; \quad \left(\frac{y}{z}\right)_{\text{ти}}\left(\frac{y}{z}\right)_{\text{шт}}. \qquad (2.19)$$

Выполнение второго положения о подобии может быть реализовано при следующих условиях: материалы образца и штампуемой заготовки должны быть реологически подобными (одинаковыми) и описываться одной и той же реологической моделью, в исходном и деформируемом состояниях структурно идентичными и иметь одинаковый уровень поврежденности, т.е.

$$\left\{\begin{array}{c} (\omega_{i0})_{\text{ти}} = (\omega_{i0})_{\text{шт}}; \\ (\omega_{ii})_{\text{ти}} = (\omega_{ii})_{\text{шт}}; \\ (E_{\sigma_i})_{\text{ти}} = \left[\frac{1}{\sigma_i}\frac{d\sigma_i}{d_i}\right]_{\text{ти}} = (E_{\sigma_i})_{\text{шт}} = \left[\frac{1}{\sigma_i}\frac{d\sigma_i}{d_i}\right]_{\text{шт}} \end{array}\right\}, \qquad (2.20)$$

где $\omega_{i0} = \omega_{i0}(e_{i0}, t_0, \tau_0)$; $\omega_{ii} = \omega_{ii}(\omega_{i0}, e_{ii}, t_i, \tau_i)$.

На основании известных экспериментальных данных предполагается, что скорость деформирования не оказывает существенного влияния на деформирование состояния образца, если обеспечивается реологическое подобие материала. При обеспечении подобия деформированного состояния, используя известные зависимости между напряжениями и деформациями за пределом упругости, можно, в силу равенства деформированных состояний, записать:

$$\left(\frac{\sigma_x + p}{\sigma_i}\right)_{\text{ти}} = \left(\frac{\sigma_x + p}{\sigma_i}\right)_{\text{шт}}; \qquad \left(\frac{\tau_{zx}}{\sigma_i}\right)_{\text{ти}} = \left(\frac{\tau_{zx}}{\sigma_i}\right)_{\text{шт}},$$

где p – гидростатическое давление.

Приведенные соотношения определяют подобие напряженного состояния образца в зоне очага пластической деформации при технологических испытаниях и состояния заготовок в моделируемом процессе штамповки.

Применяемые в настоящее время методы технологических испытаний делят на шесть групп в зависимости от вида моделируемых процессов штамповки. Первая группа технологических испытаний предназначена для определения параметров процессов разделительной штамповки (отрезки, вырубки, пробивки и др.). Основным видом технологического испытания первой группы служит испытание на срез. Вторая группа испытаний предназначена для оценки штампуемости заготовок путем формоизменения в них полостей различного профиля до разрушения заготовок. Критерием оценки штампуемости служит глубина полости, образуемой до разрушения. Третья группа испытаний предназначена для оценки штампуемости материалов в операциях глубокой вытяжки. Критерием штампуемости служат предельные до разрушения коэффициент вытяжки и степень деформации. Четвертая группа испытаний предназначена для качественной оценки штампуемости материалов при гибке. Критерием оценки являются угол и количество перегибов испытуемой заготовки до момента разрушения или излома. Пятая и шестая группы испытаний предназначены для оценки качества штампуемых деталей, изготавливаемых соответственно раздачей и обжимом из трубных или полых штампованных заготовок. Анализ технологических испытаний, в особенности стандартизованных, позволил сделать вывод о том, что многие испытания не учитывают критериев подобия, а следовательно, не позволяют по результатам исследований строить математические модели процессов штамповки по основным характеристикам технологических свойств.

Испытание на срез обычно проводится на универсальных испытательных машинах, на которых устанавливается специальный экспериментальный вырубной штамп.

При этом определяются следующие характеристики:

- $\left(\sigma_{\text{ср}}\right)_{\text{усл}} = P_{\max}/F_{\text{усл}}$ – условное сопротивление срезу;
- $\left(\sigma_{\text{ср}}\right)_{\text{ист}} = P_{\max}/F_{\text{ист}}$ – истинное сопротивление срезу;
- $h_{\text{т}}/S_0$ – относительная глубина внедрения пуансона в металл до появления скалывающих трещин, где $P_{\max}$ – максимальное усилие отрезки (вырубки); $F_{\text{усл}} = \pi D_0 S_0$ – условная площадь поверхности среза; $F_{\text{ист}} = \pi D_0\left(S_0 - h_{\text{m}}/S_0\right)$ – действительная площадь поверхности среза; D_0, S_0 – диаметр и толщина круглой заготовки; $h_{\text{т}}$ – величина хода пуансона

до момента достижения $P_{\max}$ примерно равного высоте блестящего пояска, образующего на поверхности среза.

Анализ характера диаграмм $P_{\text{тс}} - h_{\text{мм}}$, $\left(\sigma_{\text{ср}}\right)_{\text{ист}\,i} - \left(h_i / S_0\right)$ позволяет установить пригодность материала к разделительным операциям, при заданных условиях штамповки (зазорах, геометрии режущих кромок, скоростях деформации).

Вторая группа технологических испытаний предназначена для оценки штампуемости, например пригодности листового материала к вытяжке куполообразных деталей, рельефной формовке путем формообразования сферическим пуансоном лунки в образце, прочно зажатом между матрицей и прижимным кольцом (известная технологическая проба Эриксена). В процессе испытания в зоне очага деформации возникает двухосное растяжение, а критерием штампуемости служит глубина лунки IE (в мм) в момент уменьшения (спада) усилия вытяжки и разрушения образца, регистрируемого специальным прибором (ГОСТ 1050–80).

Характер разрушения и качество поверхности лунки позволяют также судить о штампуемости материала: разрыв лунки по дуге окружности указывает на изотропность металла, прямолинейный разрыв, особенно в направлении прокатки, свидетельствует об анизотропии свойств металла, полосчатой структуры или о наличии дефектов прокатки. Чистая гладкая поверхность лунки характеризует мелкозернистую, шероховатая – крупнозернистую структуру.

Испытание на глубину формовки лунки проводят также с целью установления категории листовой стали по ГОСТ 9045–80 (Г – глубокая, ВГ – весьма глубокая, СВ – сложная вытяжка, ОСВ – особо сложная вытяжка, ВОСВ – весьма особо сложная вытяжка). Чем больше глубина лунки, тем выше категория стали.

Третья группа технологических испытаний предназначена для оценки штампуемости материалов в операциях вытяжки, в очаге деформации которой действует плоская разноименная схема напряженного состояния (растяжение–сжатие).

Основным критерием, определяющим способность материала к вытяжке без утонения, служит предельный коэффициент вытяжки цилиндрического колпачка, равный: $m_{\text{пр1}} = d_{1\text{ср}} / D_0$ – для первой вытяжки; $m_{\text{пр}i} = d_{i\text{ср}} / d_{i-1\text{ср}}$ – для любой последующей вытяжки, где $d_{1\text{ср}} = d_{\text{п1}} + S_0$; $d_{i\text{ср}} = d_{\text{п}i} + S_0$; $d_{\text{п1}}$, $d_{\text{п}i}$ – диаметры пуансона на первой и последующей вытяжках.

Для тонкостенных заготовок можно принимать наружные диаметры заготовок d, d_i.

Предельным коэффициентом вытяжки считается тот, при котором еще не происходит разрыв заготовок, но дальнейшее незначительное увеличение

диаметра заготовки (на 1…2 мм) приводит к разрушению штампуемого материала. Известны различные варианты этой технологической пробы: по Свифту (Англия), по Энгельгардту (Германия), по Фукуи (Япония) и др.

В табл. 2.23 приведены в качестве примера нормы на глубину вытяжки (формовки) для некоторых материалов.

Таблица 2.23

Нормы на глубину вытяжки (по Эриксену)

Наименование материала	Глубина вытяжки в зависимости от толщины материала, мм									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Латунь для глубокой вытяжки	12,8	13,5	13,8	14,2	14,3	14,4	14,5	14,6	14,7	14,7
Латунь обычного качества	11,3	12,2	12,7	13,0	13,3	13,5	13,7	13,8	14,1	14,3
Медь листовая	9,6	10,5	11,1	11,4	11,8	12,1	12,3	12,6	12,8	13,0
Стальная лента для глубокой вытяжки	8,6	9,5	10,1	10,6	11,0	11,4	11,8	12,1	12,3	12,6
Алюминий листовой	7,6	8,7	9,2	9,5	9,9	10,2	10,7	11,1	11,2	11,7
Сталь листовая для глубокой вытяжки	7,3	8,3	8,9	9,5	10,1	10,6	10,9	11,3	11,7	12,2
Сталь декапированная	6,6	7,8	8,6	9,2	9,7	10,2	10,6	11,1	11,4	11,8

Следует отметить, что применяемые технологические испытания для оценки пригодности к вытяжке не позволяют оценивать пригодность материала к вытяжке с утонением, так как в этом случае схема напряженно-деформированного состояния заготовки в зоне очага деформации близка к объемной схеме при возникновении значительных контактных напряжений, превышающих предел текучести материала заготовки.

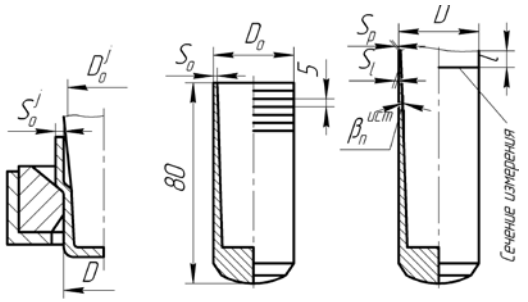
В этом случае оценка технологических свойств может производиться по результатам натурных испытаний, заключающихся в пробной свертке (вытяжке) колпачков из материала исходных заготовок в заводском штампе.

Свернутые колпачки подвергаются осмотру. При этом выделяются колпачки, имеющие прорванное или надорванное дно, трещины на радиусном участке, фестоны. Если процент дефектных колпачков больше доступного (больше 1%), прибегают к повторному испытанию, для которого металл берется в двойном количестве по сравнению с первым испытанием. Если повторное испытание показывает неудовлетворительные результаты, вся партия металла бракуется.

Если при свертке колпачков наблюдаются массовые обрывы дна колпачков, испытание повторяют на других прессах, и в случае повторения указанных дефектов эти обрывы относятся к дефекту материала исходной заготовки.

Нормы отбора проб для натурных испытаний должны регламентироваться техническими условиями на металл.

Для исследования предельных деформаций при вытяжке с утонением может быть применена схема натурных испытаний через одну или две матрицы (рис. 2.44,*а*). Опытные заготовки деформируют в универсальном штампе инструментом, имеющим форму, характерную для процесса вытяжки с утонением.



а *б* *в*

Рис. 2.44. Схема натурных испытаний при вытяжке с утонением

В каждой опытной точке плана эксперимента разрушение достигается последовательным подбором матриц с соответствующей величиной диаметра вытяжного пояска. Определение предельных деформаций основано на деформировании опытных заготовок до разрушения и последующем расчетом степени деформации в месте разрушения. Степень предельной деформации рассчитывают по исходным размерам заготовок и ее размерам в месте разрыва. Сечение исходной заготовки, соответствующее месту разрыва, определяют по предварительно нанесенным кольцевым рискам (рис. 2.44,*б*), а исходные размеры – измерением в отмеченных сечениях толщины стенки заготовки S_0^j и наружного диаметра D_0^j. Толщину стенки в месте разрушения $S_{\text{р}}$ рассчитывают по измеренной толщине в некотором произвольном сечении S_l и известному значению угла конусности внутренней поверхности разрушенной заготовки, соответствующему истинному углу конусности пуансона $\beta_{\text{П}}^{\text{ист}}: S_{\text{р}} = S_{l_{\text{ср}}} - l\text{tg}\beta_{\text{П}}^{\text{ист}}$, при l расстоянии от произвольного сечения до места разрушения (рис. 2.44,*в*). Для расчета предельной до разрушения степени деформации используется формула

$$e_{i\text{р}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{F_0}{F_{\text{р}}} 100\%,$$

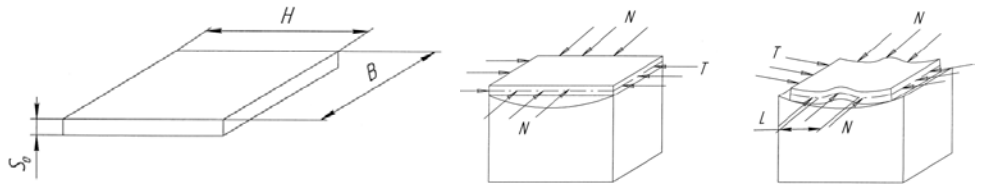
где $F_0 = \pi(D_0 - S_{0\text{ср}}^j) S_{0\text{ср}}^j -$ площадь поперечного сечения исходной заготовки, соответствующего месту разрушения; $F_{\text{р}} = \pi(D - S_{\text{рср}}) S_{\text{рср}}$ – площадь поперечного сечения заготовки в месте разрушения.

Для исследования предельных деформаций при обжиме применяется шестая группа технологических испытаний.

Так как складко- и гофрообразование при обжиме металлических элементов изделий вызывается главным образом локализацией деформации при пластическом сжатии в момент, предшествующий потере устойчивости, то авторами предложен метод технологического испытания, который заключается в деформировании до потери устойчивости пластинчатого прямоугольного образца (рис. 2.45) на вогнутой цилиндрической поверхности сжимающими силами T и N, приложенными по всем его торцам и действующими в перекрещивающихся, взаимно перпендикулярных в плане направлениях. При этом силы равны:

$$T = \sigma_\theta F_T,$$
$$N = \sigma_\rho F_N,$$

где $\sigma_\theta, \sigma_\rho$ – главные нормальные сжимающие напряжения, действующие в тангенциальном и меридиональном направлениях соответственно; $F_{T,} F_N$ – площади контакта торцевых поверхностей образца и инструмента.



а *б* *в*

Рис. 2.45. Схема технологического испытания листового материала на пластическое сжатие: *а* – исходный образец; *б* – схема нагружения; *в* – схема потери устойчивости образца

Габаритный размер образца A (рис. 2.45,*а*) определяется с учетом зарождаемой на образце складки в приграничных с рабочим инструментом заторможенных зонах. Как установлено, длина складки L (рис. 2,45,*в*) относительно толщины образца равна: $L = (5…6)S_0$. Экспериментальные исследования размеров заторможенной, приграничной с инструментом зоны образца показали, что ее протяженность равна $\approx 1{,}5S_0$. Отсюда размер исходного образца $A \geq (8...9)S_0$. Регистрация начала потери устойчивости обеспечивается визуально или специальным пневмоакустическим датчиком.

Величину предельной до потери устойчивости деформации рассчитывают по соотношению начальных и конечных размеров нанесенной на поверхность образца делительной сетки:

$$\varepsilon_\theta = \ln\frac{d}{D_0};\ \varepsilon_n = \ln\frac{S}{S_0};\varepsilon_\rho = -(\varepsilon_\theta + \varepsilon_n);\ e_{iy} = \varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{\varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_n^2 + \varepsilon_n\varepsilon_\theta},$$

где $D_0, d -$ диаметр кольцевой риски до и после деформации $S_0, S -$ толщина образца до и после деформации.

Предельные деформации при поперечном (радиальном) выдавливании могут также исследоваться по схеме натурного процесса (рис. 2.46). По существу предельная деформация в этом процессе ограничивается потерей устойчивости с образованием шейки на наружной боковой поверхности выдавливаемого диска и последующим разрушением металла в этом месте. С учетом соответствия вида деформированного состояния в опасной зоне линейному растяжению предельная до потери устойчивости деформация при поперечном выдавливании рассчитывается по формуле

$$e_{iy} = \ln\frac{L}{L_0} \cong \ln K_d,$$

где $L_0 = \pi D_0 -$ периметр исходной прутковой заготовки; $L = \pi D -$ периметр выдавленной части заготовки (ввиду нестрогой симметричности этой части заготовки целесообразно производить его фактическое измерение, а не расчет через диаметр); $K_d = D/D_0 -$ коэффициент высадки.

Для получения вероятностных моделей предельных деформаций проводятся статистические исследования параметров распределения.

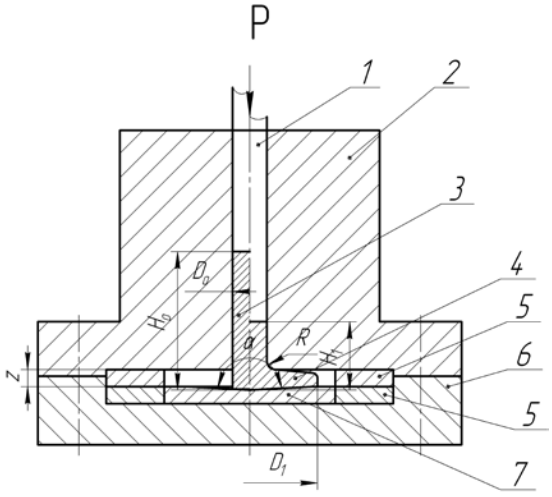


Рис. 2.46. Схема устройства для технологического испытания на радиальное выдавливание: *1* – пуансон; *2* – корпус; *3* – заготовка; *4* – заготовка после деформирования; *5* – кольца; *6* – нижняя плита; *7* – подкладной диск

Библиографический список

1. *Агеев Н.П.,* Данилин Г.А., Огородников В.П. Технология производства патронов стрелкового оружия: учебник. Ч. 1. Технологические основы проектирования патронов / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2005. 352 с.
2. *Агеев Н.П.,* Спинул Г.П. Механические и технологические свойства конструкционных и металлических материалов патронно-гильзового производства: учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 1993. 87 с.
3. *Мальцев М.В.* Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1970. 364 с.
4. *Лясников А.В.,* Агеев Н.П., Данилин Г.А. и др. Сопротивление материалов пластическому деформированию в приложениях к процессам обработки металлов давлением. СПб.: Внешторгиздат, 1995. 527 с.
5. *Днестровский Н.З.,* Померанцев С.Н. Краткий справочник по обработке цветных металлов и сплавов. М.: Металургиздат, 1958. 406 с.
6. *Справочник* по машиностроительным материалам. Т.2. Цветные материалы и их сплавы /Под ред. М.А. Бочарова. М.: Машгиз, 1959. 638 с.
7. *Зуев М.И.,* Култыгин В.С. и др. Пластичность стали при высоких температурах. М.: Металлургиздат, 1954. 102 с.
8. *Третьяков А.В.,* Зюзин В.И. Механические свойства металлов при обработке давлением: справочник. М.: Металлургия, 1973. 225 с.
9. *Аверкиев А.Ю.* Методы оценки штампуемости листового металла. М.: Машиностроение, 1985. 176 с.

3. ПИРОТЕХНИЧЕСКИЕ СОСТАВЫ, ПОРОХА, КАПСЮЛИ-ВОСПЛАМЕНИТЕЛИ

3.1. Пиротехнические составы для трассирующих пуль

Трассирующими пулями снаряжают патроны для стрельбы из всех видов стрелкового оружия (рис. 3.1).

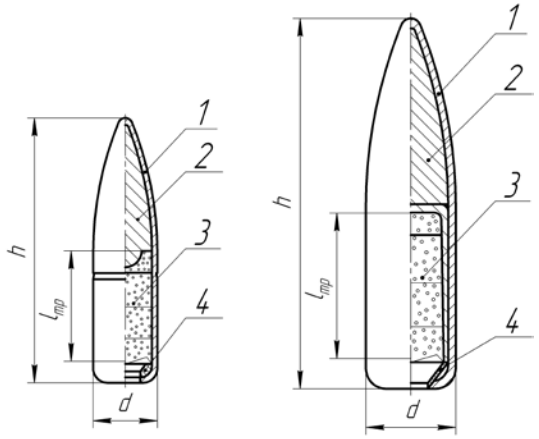


Рис. 3.1. Трассирующие пули: *а* – клб. 5,45 мм (7Т3); *б* – клб. 7,62 мм; *1* – оболочка; *2* – сердечник; *3* – трассер; *4* – колечко

Кроме обыкновенного действия (убойного, останавливающего, проникающего), они предназначены для высвечивания траектории полёта пули (трассы), корректирования огня, целеуказания, сигнализации и способны поджигать легко воспламеняющиеся объекты. Необходимая яркость трассы и дальность трассирования обеспечиваются конструкцией трассера, свойствами и химическим составом компонентов горения. Для создания высокой плотности и достаточной прочности, обеспечения равномерности горения параллельными слоями трассирующий состав запрессовывается в несколько приёмов при действии высокого давления на инструмент (p – 800...900 МПа), превышающего давление газов в канале ствола. При недостаточном усилии запрессовки возможны разрушение пиросостава при выстреле, возгорание всего объёма и разрыв пули на траектории. Воспламенение трассирующего состава происходит от пороховых газов внутри канала ствола. Надёжность воспламенения обеспечивают увеличением поверхности возгорания за счёт рельефной запрессовки (звёздочкой) нижней поверхности пиросостава, а повышение чувствительности – добавлением в последнюю дозу состава легковоспламеняющихся веществ (например, дымного пороха).

Иногда, во избежание негативного воздействия на трассирующий состав внешних атмосферных факторов, особенно при длительном хранении патронов, выходное отверстие покрывают лаком или фольгой. Такой же приём используют для замедления воспламенения трассирующего состава и начала горения на определённой дистанции (50... 120 м) от стрелка с целью его маскировки (вынос трассы). Вынос начала трассирования снижает вероятность обнаружения и поражения стрелка, уменьшает засветку ночных прицелов в ночное время. Однако для оружия малых автоматных калибров вынос трассы на такое расстояние не всегда оправдан, так как наиболее эффективная дистанция стрельбы из него составляет 200...300 м.

Особенностью функционирования трассирующих пуль является изменение массы и положения центра масс пули по мере выгорания пиросостава. Продольное и поперечное смещения центра масс делают пули динамически не уравновешенными и вызывают увеличение рассеивания в 1,5...2,0 раза по сравнению с обыкновенными пулями. Во избежание этого рекомендуется по возможности уменьшать поперечные размеры и массу трассирующего состава, применять пиросоставы с небольшой скоростью и слабым пламенем горения, что не уменьшает дальность трассирования и улучшает маскировку оружия.

При проведении монтажных операций на поверхности трассирующих пуль не делают поперечных кольцевых канавок. Такая операция, проводимая для повышения плотности монтажа и обозначения места закатки гильзы, может привести к разрушению трассирующего состава. Поэтому крепление трассирующей пули в дульце гильзы обеспечивается соответствующей посадкой с натягом.

К трассирующим составам предъявляют следующие требования:

- высокая чувствительность к возгоранию от пороховых газов и воспламенительных составов;
- большая сила света при небольшой скорости горения;
- хорошая обрабатываемость прессовкой и достаточная прочность;
- невысокая плотность и образование в процессе горения большого количества шлаков;
- несклонность к детонации и взрыву;
- дешевизна и недефицитность компонентов состава.

Трассирующие составы представляют собой механические смеси горючего вещества и окислителя с добавкой цементаторов, являющиеся одновременно флегматизаторами, регламентирующими скорость горения. В качестве горючих веществ применяют алюминий, магний и сплавы этих металлов, которые обладают высокой химической активностью при взаимодействии с кислородом, выделяют при горении большое количество тепла. Окислители – вещества, богатые кислородом и сравнительно легко отдающие его при высокой температуре. В отечественном производстве применяют перекиси и оки-

си бария, кальция, стронция; хлораты и перхлораты бария, калия, натрия; нитраты бария, калия, натрия, стронция. Цементатором (флегматизатором) служат искусственные и естественные смолы: идитол, шеллак, канифоль и другие, обладающие хорошими горючими свойствами. Иногда в качестве флегматизаторов специально применяют касторовое масло, парафин, вазелин, понижающие скорость горения трассирующего состава и чувствительность к механическим воздействиям.

В зависимости от рецептуры трассирующего состава получают различную окраску пламени: соли бария придают светло-зелёную окраску, соли стронция – красную, натрия – жёлтую. Предпочтение отдаётся красной окраске, обеспечивающей хорошую видимость трассы ночью и в яркую солнечную погоду днём.

К воспламенительным составам предъявляют следующие требования:

- хорошая воспламеняемость от пороховых газов при движении пули по каналу ствола;
- высокая температура горения, необходимая для надёжного воспламенения трассирующего состава;
- высокая механическая прочность;
- негигроскопичность;
- отсутствие вредных продуктов горения, влияющих на состояние и живучесть канала ствола;
- минимальное свечение при горении в целях лучшей маскировки оружия;
- невысокая скорость горения;
- дешевизна и недефицитность компонентов.

В табл. 3.1 приведена рецептура некоторых трассирующих и воспламенительных составов.

Рецептура воспламенительного состава, обеспечивающего вынос трассы на 50...120 м: свинцовый сурик – 54,5%; оксид железа – 6,0%; ферросилиций – 27,0%; бор аморфный – 6,0%; фторопласт – 4,5%; магний – 2,0%.

Яркость трассы будет постоянной, если для одного и того же трассирующего состава сохраняется его расход, т.е.

$$F_{\text{тр1}} \cdot u_{\text{тр1}} = F_{\text{тр2}} \cdot u_{\text{тр2}}.$$

Поэтому для вновь разрабатываемой конструкции пули методом подобия можно определить площадь поперечного сечения трассера $F_{\text{тр2}}$:

$$F_{\text{тр2}} = F_{\text{тр1}} \cdot \frac{u_{\text{тр1}}}{u_{\text{тр2}}},$$

где $F_{\text{тр1}}$ – площадь поперечного сечения; $u_{\text{тр1}}$ – скорость горения трассирующего состава пули-аналога.

В этом случае для сохранения яркости трассы необходимо изменить скорость горения за счёт рецептуры химического состава (уменьшения или уве-

личения флегматизатора) или изменения диаметра выходного отверстия. С уменьшением диаметра скорость горения пиросостава несколько возрастает вследствие повышения давления в трассере.

Таблица 3.1

Рецептура трассирующих и воспламенительных составов, %

Компоненты	Варианты трассирующих составов						Варианты воспламенительных составов			
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4
Азотнокислый барий	63	–	42	–	–	–	48	48	32,5	26
Азотнокислый стронций	–	60	–	61,5	48	54	–	–	–	–
Углекислый стронций	–	–	–	–	–	5	–	–	–	–
Перекись бария	–	–	30	–	–	–	30	–	45	50
Свинцовый сурик	–	–	–	–	–	–	–	28	–	–
Алюминий	–	–	–	3	–	–	–	–	–	–
Магний	15	23	22	26	21	21	13	15	15,5	17
Сплав магний-алюминий	15	6	–	–	9	–	–	–	–	–
Идитол	7	–	6	9,5	8	–	9	9	7	7
Поливинилхлорид	–	–	–	–	5	9	–	–	–	–
Идитол и канифоль	–	–	–	–	–	11	–	–	–	–
Уротропин, фенол-формальдинд	–	–	–	–	9	–	–	–	–	–
Графит*	–	11	–	–	0,5	–	–	–	–	–

* Содержание графита свыше 100%.

Опытная проверка дальности и безотказности трассирования проводится на полигоне по специальной инструкции в соответствии с техническим заданием или тактико-техническими требованиями на изделие.

3.2. Пиротехнические составы для зажигательных пуль

Зажигательные пули относятся к специальным и предназначены для воспламенения различных целей. По конструкции их разделяют на два вида: с непрерывным горением пиросостава и с ударным его воспламенением при попадании в жёсткую преграду.

Пули первого вида снаряжают белым фосфором, который возгорается, соединяясь с кислородом воздуха. На полёте фосфор вытекает из отверстия в оболочке, запаянного легкоплавким сплавом. При движении в стволе этот сплав плавится и таким образом открывает отверстие для выхода под действием центробежных сил фосфора, загорающегося на траектории. Эти пули имеют высокую чувствительность и способны зажигать цели, обладающие малым сопротивлением, в любой точке траектории.

Пули второго вида срабатывают только при ударе в цель. Воспламенение зажигательного состава происходит при разрушении оболочки и воспламенении пиросостава, соединяющегося с кислородом воздуха и зажигающего цель. Для проявления зажигательного действия требуется определённое сопротивление преграды, поэтому пули этого вида не обладают высокой чувствительностью. Для повышения чувствительности в конструкциях ударных зажигательных пуль необходимо либо ослабить вершину оболочки, либо установить чувствительный тонкий наконечник, либо разместить в хвостовой части пули позади зажигательного состава массивный сердечник.

Фосфорные пули небезопасны при снаряжении, транспортировке и хранении и требуют особой осторожности в обращении. В настоящее время они не применяются.

В двигателях боевой и вспомогательной техники используют так называемые тяжёлые виды топлива: дизельное, керосин и пр. Поэтому для снаряжения зажигательных и бронебойно-зажигательных пуль применяют составы, способные воспламенять такое горючее. Например, для крупнокалиберных пуль используют пиротехнический состав, включающий нитрат натрия, сплав "алюминий–магний" в соотношении 50×50% или 30×50%, с добавкой ТЭНа, повышающего вероятность вспышки. Для тяжёлых видов топлив существует взаимозависимость между температурой кипения и температурой окружающей среды, при которой обеспечиваются вспышка и горение топлива (рис. 3.2).

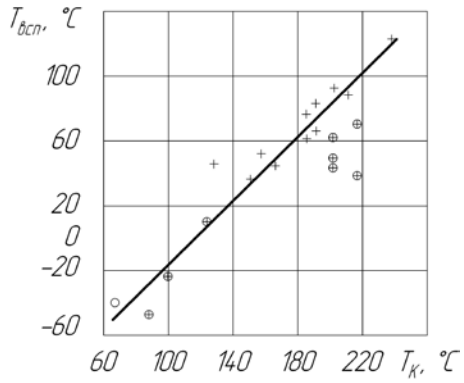


Рис. 3.2. Зависимость температуры вспышки жидкого топлива от температуры его кипения

Воспламенение и горение жидкого топлива происходит в газовой фазе, когда концентрация пара углеводорода в воздухе достигает определённой величины. Для смесей различных видов топлива с воздухом существуют нижние и верхние пределы концентрации (богатые и бедные смеси), когда возможно устойчивое воспламенение. При температуре ниже нижнего и выше верхнего пределов воспламенения над жидкой фракцией топлива образуются не возгорающиеся в воздухе концентрации паров. Воспламеняющейся смесью считается такая, в которой пламя распространяется независимо от источника зажигания. Это означает, что источник зажигания обеспечивает только первоначальное зажжение паровоздушной смеси топлива, после чего пламя распространяется после ликвидации источника зажигания. В негорючей концентрации смеси этого не происходит.

Инициирование взрывчатого превращения пара углеводородного топлива тяжёлых фракций происходит в результате образования локальной концентрации пара после испарения топлива, находящегося вблизи источника воспламенения. После возгорания формируется начальный фронт пламени, происходит прогрев и дополнительное испарение, превращающее негорючую смесь в горючую.

Температура жидкого топлива, при которой пары над его поверхностью образуют с воздухом смесь, способную воспламеняться при поднесении источника зажигания, называется температурой вспышки. Температура вспышки и нижний предел воспламенения горючих жидкостей совпадают. Скорость горения жидкого топлива определяется скоростью испарения его летучих фракций.

При попадании элементов пули в бак гидродинамические силы создают в жидкости волну давления. Жидкость разбрызгивается, образуя паровоздушную смесь. Естественно, что для зажжения тяжёлых жидких видов топлива продолжительность и температура горения зажигательного состава должны быть больше, чем для воспламенения бензина. Продукты сгорания должны остывать медленно, что зависит от размера частиц, их плотности и теплоёмкости.

Как уже указывалось, для усиления эффективности действия зажигательные пули снаряжают пиротехническими составами с добавлением взрывчатых веществ (ВВ). Для повышения чувствительности в конструкции пуль предусматривают ослабление головной части оболочки, применяют наконечники из мягкого материала (томпак, медь, латунь), располагают за пиротехническим составом массивный сердечник. При встрече с преградой оболочка деформируется и состав сжимается между стенками оболочки и поверхностью сердечника. От активного трения частиц состава о контактные поверхности происходит возгорание. Вспышка соответствует моменту удара о преграду, которая ещё не пробита. Только затем раскалённые частицы втягиваются в пробитое отверстие. В таких конструкциях форс огня используется неэффективно, так как только малая часть его попадает в запреградное пространство (рис. 3.3,*а*).

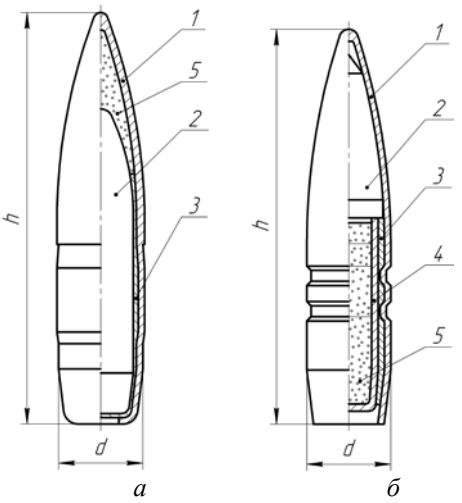


Рис. 3.3. Бронебойно-зажигательные пули с расположением состава впереди (*а*) и за бронебойным сердечником (*б*): *1* – оболочка; *2* – бронебойный сердечник; *3* – рубашка; *4* – пиростакан; *5* – зажигательный состав

Более рационально используется зажигательный состав в пулях, где он расположен за бронебойным сер-

дечником (рис. 3.3,*б*). Такая конструкция обеспечивает более благоприятные условия для зажжения топлива (в том числе и тяжёлого). Воспламенение зажигательного состава и пробитие брони осуществляются одновременно, активная масса сердечника усиливается массой расположенных сзади элементов и дополнительным импульсом от срабатывания состава. Большая часть форса огня попадает в запреградное пространство, локализует тепловой эффект, который с гидродинамическим ударом создаёт условия для интенсивного возгорания топлива. К недостаткам таких пуль следует отнести меньшую чувствительность по сравнению с пулями, в которых зажигательный состав расположен спереди.

Для зажжения материалов, находящихся за тонкой преградой, имеющей невысокую твёрдость (алюминий, тонкая сталь и т.п.), а также для обозначения попадания и определения правильности выбора прицела применяют более чувствительные пули со специальным капсюльным устройством.

Разрывные (пристрелочные) пули предназначены для бризантного поражения целей. При соударении с преградой они разрываются под действием взрывчатого вещества и дают увеличенную область поражения в сравнении с другими видами пуль. Яркая вспышка и облачко дыма при разрыве пули позволяют наблюдать за результатами стрельбы и корректировать огонь на местности, поэтому такие пули называют ещё и пристрелочными.

Эффективность действия разрывных пуль зависит от рецептуры и количества взрывчатого вещества, находящегося в пуле, а также от надёжности срабатывания взрывателя. При попадании в цель обеспечивается не только разрывное, но и мощное зажигательное действие, для чего в ВВ добавляют зажигательный состав термитного типа.

Крупнокалиберные разрывные пули содержат в своей конструкции взрыватели мгновенного действия. Особенностью конструкции пули МДЗ (мгновенного действия зажигательной) является то, что в капсюле детонатора отсутствует ударник. Капсюль срабатывает при соударении с целью осколками мягкого наконечника, пробиваемого рубящей трубкой. Взрывчатым веществом здесь служат гексоген, тротил, тетрил, ТЭН. Тротил – мощное взрывчатое вещество, мало чувствительное к удару и трению, его плотность – 1600 кг/м^3. Тетрил при той же мощности обладает большей чувствительностью к удару и легче детонирует. В целях безопасности его сплавляют с 30...40% тротила для некоторого снижения чувствительности. ТЭН и гексоген обладают мощным разрывным свойством, достаточно чувствительны к удару и детонации и часто применяются для снаряжения разрывных пуль.

3.3. Пороха для патронов стрелкового оружия

Пороховой заряд подбирают по величине дульной скорости, характеру нарастания давления, плотности заряжания и другим параметрам.

Порох – взрывчатое вещество, являющееся источником энергии движения пуль, – легко воспламеняется и обычно горит параллельными слоями, что

позволяет регулировать интенсивность выделения газов и управлять процессом выстрела. К порохам предъявляют следующие требования:

- достаточная мощность (работоспособность), обеспечивающая высокое метательное или воспламеняющее действие;
- определённая чувствительность к механическим и тепловым импульсам, создающая условия для безотказного действия боеприпасов и обеспечивающая безопасность в обращении;
- неизменность физико-химических и баллистических свойств в процессе хранения;
- способность к устойчивому и закономерному горению;
- высокая механическая прочность пороховых элементов;
- бездымность и, по возможности, беспламенность при стрельбе;
- минимальное коррозионное и эрозионное действия на поверхность канала ствола;
- невысокая стоимость и недефицитность исходных материалов.

В практике патронного производства применяют две группы порохов: механические смеси и коллоидные. Механические смеси, к которым относится дымный порох, обладают высокой мощностью, но горят закономерно только при значительных плотностях пороховых зёрен с большим выделением дыма. Поэтому они почти не применяются для метательных целей и используются для изготовления воспламенителей, вышибных зарядов и других пиротехнических устройств.

Коллоидные пороха обычно горят закономерно, параллельными слоями с минимальным выделением частиц (дыма) и в основном используются для метательных целей. Основой порохов этой группы являются нитраты целлюлозы. В зависимости от растворителя, применяемого для обработки нитратов целлюлозы, коллоидные пороха подразделяют на следующие виды:

- пироксилиновые, получаемые обработкой нитратов целлюлозы спиртоэфирной смесью;
- нитроглицериновые (баллиститы), получаемые обработкой низкоазотных нитратов целлюлозы нитроглицерином или другим нитратом многоатомного спирта;
- пороха на смешанном растворителе (кордиты), получаемые обработкой высокоазотных нитратов целлюлозы (пироксилина) нитроглицерином и дополнительным летучим растворителем (ацетон, спиртоэфирная смесь и др.), который подлежит полному удалению из состава готового пороха;
- пороха на нелетучем растворителе, получаемые специальной обработкой низкоазотных нитратов целлюлозы твёрдыми желатинизаторами (пластификаторами) при повышенной температуре.

В стрелковом оружии для снаряжения патронов применяют пороха на летучем растворителе – пироксилиновые. Они состоят из пироксилина –

95...96%, спиртоэфирной смеси – 2,5%, дифениламина (стабилизатора) – 1%, воды – 1%.

По форме зёрен пироксилиновые пороха для стрелковых патронов могут быть (рис. 3.4) пластинчатыми, сферическими, зерненными (без канала, с одним и семью каналами). Некоторые пороха для улучшения баллистических свойств обрабатывают флегматизаторами, обычно камфарой. Для улучшения сыпучести пороховые зёрна обрабатывают графитом.

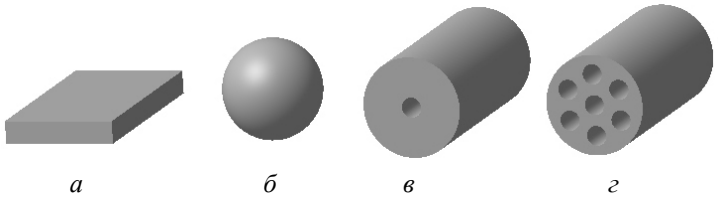


Рис. 3.4. Форма пороховых зёрен: *а* – пластина; *б* – шар; *в* – цилиндр с одним каналом (трубочный); *г* – цилиндр с семью каналами

Плотность пороха зависит от технологии его изготовления и содержания летучих веществ и колеблется от 1540 до 1620 кг/м^3. Гравиметрическая плотность зерненых порохов, характеризующая вместимость пороха в гильзу и зависящая от его плотности, формы и размеров зёрен и способа обработки их поверхности, находится в пределах 800... 1100 кг/м^3.

Физическая и химическая стабильность пороха характеризуется способностью сохранять свои свойства в процессе хранения. Уменьшение со временем летучих веществ влияет на скорость горения, а следовательно, на максимальное давление пороховых газов и начальную скорость пули. Разложение со временем пороховых компонентов, особенно при изменяющейся температуре окружающей среды, влажности и других факторах, влияет на срок пригодности пороха. Продолжительность хранения различных стабилизированных порохов составляет 20...35 лет.

Состав продуктов горения определяют сжиганием пороха в калометрической бомбе. Основную массу составляют углекислый газ CO_2 , окись углерода CO, водород H_2, азот N_2 и пары воды H_20. Соотношение этих продуктов может изменяться в зависимости от условий заряжания и сгорания порохового заряда.

Температура горения пороха T_1^o,*К* определяет работоспособность пороховых газов и для пироксилиновых порохов составляет 2900...3200°*К*, для нитроглицериновых 3000...3500° *К*.

Теплота взрывчатого разложения пороха $Q_п$ зависит главным образом от содержания азота в пироксилине и летучих веществ в порохе. С увеличением содержания азота работоспособность пороха возрастает, а с увеличением летучих веществ уменьшается. Теплота взрывчатого разложения пироксилиновых порохов находится в пределах $Q_п$ = 700...900 ккал/кг, а нитроглицериновых $Q_п$= 1000... 1200 ккал/кг.

Объём пороховых газов W_1, дм^3/кг, который они занимают при давлении 760 мм рт.ст. и температуре 0°С после сжигания 1 кг пороха, также определяет работоспособность пороховых газов, зависит от содержания азота и для пироксилиновых порохов находится в пределах W_1 = 850...950 дм /кг.

Сила пороха f, кгс·дм/кг, характеризующая его работоспособность, может быть определена зависимостью

$$f = \frac{p_1 \cdot W_1 \cdot T_1}{273},$$

где p_1 – одна физическая атмосфера. Для пироксилиновых порохов сила пороха находится в пределах 900000 ... 1000000 кгс·дм/кг, для нитроглицериновых 900000 ... 1200000 кгс·дм/кг.

Кроме вышеперечисленных характеристик, на баллистические параметры стрельбы влияют форма и размеры пороховых зёрен, определяющие скорость горения и интенсивность нарастания давления пороховых газов. Скорость сгорания заряда зависит от изменения поверхности пороховых зёрен, которая может нарастать или убывать в процессе горения. В зависимости от этого различают пороха прогрессивной формы, дигрессивной формы и пороха с постоянной поверхностью горения.

Пороха дигрессивной формы (шар, куб, цилиндр, пластинка – рис. 3.4,*а,б*) характеризуются уменьшением поверхности горения пороховых зёрен. Пороха прогрессивной формы (цилиндрическое зерно с семью каналами – рис. 3.4,*г*) отличаются тем, что поверхность горения постоянно нарастает до момента распада зерна на отдельные дигрессивные кусочки. Порох с постоянной поверхностью горения имеет трубчатую форму (рис. 3.4,*в*).

Важнейшей характеристикой порохов является толщина горящего свода $2e_1$, существенно влияющая на скорость горения, максимальное давление пороховых газов и начальную скорость пули. Например, изменение толщины горящего свода $\Delta 2e_1$ может быть учтено при расчёте начальной скорости пули выражением

$$\frac{\Delta v_0}{v_0} = -\frac{1}{3} \cdot \frac{\Delta 2_1}{2e_1}.$$

Следует указать на то, что дигрессивный порох путём соответствующей обработки флегматизатором может быть превращен в прогрессивный по характеру горения. Так, например, сферический порох после флегматизации обладает прогрессивными свойствами, сохраняя высокую плотность заряжания за счёт своей формы.

Скорость горения u зависит от химического состава пороха, конструкции пороховых зёрен, внешнего давления, температуры и других факторов. Для пироксилиновых порохов u_1=(0,6...1,0)·10^{-5} дм·дм/кгс·с, для нитроглицериновых u_1 =(0,6...0,9)·10^{-5} дм·дм/кгс·с.

Импульс пороха J_1, определяющий интенсивность нарастания давления пороховых газов, зависит от скорости горения u и толщины горящего свода $2e_1$:

$$J_1 = \frac{e_1}{u_1}.$$

Импульс пороха – важнейшая баллистическая характеристика, существенно влияющая на параметры заряжания и начальную скорость пули.

В последнее время для снаряжения патронов к стрелковому оружию широко применяются лаковые пороха – самостоятельная группа бездымных порохов, полученных из лака нитроцеллюлозы в органическом растворителе.

По способу получения лаковые пороха подразделяют на пороха эмульсионного и экструзионного изготовления, по форме пороховых элементов – на сфероидные и эллипсоидные, по плотности – на плотные и пористые.

Лаковые пороха имеют специальную маркировку, где первая прописная буква обозначает: С – для патронов стрелкового оружия; П – для зарядов из пористых порохов; А – для зарядов артиллерийских выстрелов; М – для зарядов к минометным выстрелам.

Вторая прописная буква: С – сфероидные; Е – эллипсоидные. Третья прописная буква обозначает содержание высокоэнергетического компонента, содержание которого в порохе более 3%: Н – нитроглицерин; Д – диэтиленгликольдинитрат; Г – гексоген; О – октоген. При наличии двух или более высокоэнергетических компонентов их следует обозначать в порядке убывания содержания в порохе.

Для порохов С, А и М в числителе указывается средний размер горящего свода в сотых долях миллиметра (или средний диаметр для порохов сфероидной формы), для пороха П – насыпная плотность в граммах на кубический дециметр. В знаменателе для всех порохов указывают среднюю удельную теплоту горения в мегаджоулях на килограмм.

Пример: ССНф 30/3,69 – порох для патронов к стрелковому оружию, сфероидной формы, содержащий нитроглицерин, флегматизированный, со средним размером горящего свода 0,3 мм, с удельной теплотой горения 3,69 МДж/кг.

При применении порохов для других целей маркировка не изменяется.

Для отечественных патронов стрелкового оружия применяют следующие марки порохов:

П-45, П-125 – пористые пороха трубчатой формы (число означает примерное количество калиевой селитры (в сотых долях процента), вводимой в пороховую массу при фабрикации пороха);

Х (Пл 10-12) – порох для холостых патронов пластинчатой формы. Первое число означает толщину горящего свода в сотых долях миллиметра, второе – длину (ширину) пластинки в десятых долях миллиметра;

ВТ – винтовочный порох трубчатой формы, флегматизированный и обработанный графитом;

ВТЖ – порох трубчатой формы для холостых патронов, с уменьшенным количеством летучих веществ, обработанный графитом;

4/7 – семиканальный порох с толщиной горящего свода 0,4;

4/7 Цгр – семиканальный порох с толщиной горящего свода 0,4 мм, с содержанием церезина, графитизированный;

5/7 н/а – семиканальный порох с толщиной горящего свода 0,5 мм, низкоазотный;

ВУфл – порох зерненый, одноканальный, флегматизированный и графитизированный, к патронам обр. 1943 г.;

ВУфл 5,45 – то же, но к патронам клб. 5,45 мм;

ССНф 30/3,69 – порох лаковый, сфероидный для патронов клб. 5,45 мм;

ССНф 30/3,97 – то же, но к патронам клб. 7,62 мм обр. 1943 г.;

ПСН 780/4,37 – порох лаковый, пористый для пистолетных патронов;

ПСН 850/4,37 – порох лаковый, пористый для пистолетных патронов клб. 5,45 мм.

Полная марка пороха содержит, кроме того, номер партии, год изготовления, шифр или номер завода-изготовителя, например:

Сф033фл 1/84К
ССНф 30/3,69 1/89Е } – для 5,45-мм патронов;

Сф033фл 1/84К или
Сф033фл - 431/84К
ССНф 30/3,97 1/89Е } – для 7,65-мм патронов обр. 1943 г.;

Сф040 1/90К
ПСН 850/4,37 1/91К } – для 5,45-мм пистолетных патронов МПЦ;

ПСН 850/4,37 1/91К – для 9-мм пистолетных патронов.

В табл. 3.2 приведены размеры пороховых зёрен и содержание летучих веществ для некоторых марок порохов.

При подборе зарядов нередко прибегают к смешиванию различных видов порохов, добиваясь оптимальных значений баллистических характеристик патрона.

Таблица 3.2

Размеры зёрен и содержание летучих веществ некоторых порохов

Патрон	Марка пороха	Размеры зёрен, мм			Содержание летучих веществ, %		
		$2e_1$	$d_{кан}$	l	общее	удаляемых	неудаляемых
9-мм пистолетный	П-125	0,30-0,40	0,10-0,20	≥1,1	2	1,0-1,8	0,2
7,62-мм пистолетный, револьверный и холостой обр.1943г.	П-45	0,27-0,37	0,10-0,20	≥1,3	1,8	1,0-1,6	0,2
Холостой винтовочный	Х(Пл.10-12)	0,08-0,16	0,8-1,3 (ширина)	0,8-1,3	2,0	1,0	0,2

Окончание табл. 3.2

Патрон	Марка пороха	Размеры зёрен, мм			Содержание летучих веществ, %		
		$2e_1$	$d_{кан}$	l	общее	удаляемых	неудаляемых
Обр. 1943г.	ВУфл	0,20-0,25	0,07-0,15	0,85-1,25	3,2	1,0-1,6	0,7
Винтовочный	ВТ	0,30-0,35	0,1-0,2	1,7-2,0	3,3	1,0-1,8	1,0
Холостой 14,5-мм	ВТЖ	0,30-0,35	0,1-0,2	1,7-2,0	1,8	0,5-1,2	0,2-0,6
12,7-мм	4/7	0,5-0,6	0,15-0,25	2,5-3,5	3,5	1,0-1,8	0,6
14,5-мм	5/7	0,4-0,5	0,15-0,25	2,9-3,8	3,3	1,0-1,8	0,6

3.4. Капсюли-воспламенители

Капсюли-воспламенители предназначены для воспламенения пороховых зарядов в патронах стрелкового оружия, в капсюльных трубках и втулках артиллерийских боеприпасов и т.п. Различают патронные и трубочные капсюли-воспламенители. В патронных капсюлях срабатывание ударного состава происходит в результате его динамического сжатия бойком на наковальне (ударные капсюли). Действие трубчатых капсюлей происходит в результате накола ударного состава острым жалом бойка (накольные капсюли).

К капсюлям-воспламенителям предъявляют следующие требования:

- безотказность действия при ударе бойка;
- надёжность воспламенения порохового заряда;
- однообразие действия по силе и времени срабатывания, обеспечивающее стабильность баллистических характеристик оружия;
- стойкость к сотрясениям при выстреле;
- безотказность в служебном обращении и в процессе производства;
- неизменность физико-химических свойств ударных составов и механических свойств корпуса при хранении;
- простота конструкции, дешевизна и недефицитность исходных материалов.

В производстве применяют две разновидности конструкций патронных капсюлей-воспламенителей: без наковальни и с собственной наковальней.

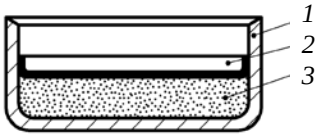


Рис. 3.5. Схема патронного капсюля-воспламенителя: *1* – чашечка; *2* – покрытие; *3* – ударный состав

Капсюли без наковальни имеют простейшую конструкцию (рис. 3.5), различающуюся в зависимости от мощности размерами. Они состоят из металлической чашечки *1*, в которую запрессован ударный состав *3*, закрытый металлической фольгой или пергаментом *2*.

Внутренняя поверхность чашечки лакируется для лучшего закрепления ударного состава и предотвращения химического взаимодей-

ствия с металлом. Ударный состав изготавливают по специальному рецепту и запрессовывают в чашечку под давлением, обеспечивающим определённую чувствительность и невозможность разрушения при транспортировке.

Внутренняя поверхность покрытия из фольги, пергамента или даже бумаги для лучшего сцепления с составом лакируется шеллачно-канифольным лаком. Бумажное покрытие с наружной стороны обрабатывают парафином.

Суммарную толщину ударного состава, фольги и дна чашечки называют высотой ударного состава. Она учитывается при сопряжении капсюля с капсюльным гнездом и должна иметь стабильный размер. При необходимом увеличении дозы ударного состава дополнительную его часть располагают по периферии чашечки за счёт фигурного торца пуансона прессовки.

Конструкция капсюлей-воспламенителей с собственной наковальней показана на рис. 3.6. Устройство их более сложное и включает в себя чашечку *2* с ударным составом *4*, наковальню *1*, размещённые в корпусе *5*. Такой вид капсюлей применяют в охотничьих патронах, в некоторых конструкциях артиллерийских патронов малого калибра и в зарубежных образцах.

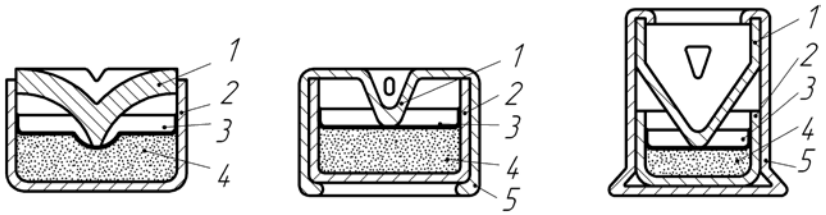


Рис. 3.6. Схема патронных капсюлей-воспламенителей с наковальней: *а* – капсюль Праймера; *б* – капсюль Норденфельда; *в* – капсюль Жевело; *1* – наковальня; *2* – чашечка; *3* – покрытие; *4* – ударный состав; *5* – корпус

Для изготовления чашечек и корпусов капсюлей применяют латунь Л68 и медь (охотничьи и миномётные патроны). Иногда используют томпак как заменитель латуни и меди. Некоторые капсюли (чашечки) для охотничьих патронов изготавливают из мягкого железа с обязательным меднением, латунированием или лакированием во избежание их коррозии.

Толщина материала для чашечек патронных капсюлей находится обычно в пределах 0,4...0,9 мм в зависимости от назначения и мощности капсюля.

Для покрытия ударного состава применяют кружки из оловянистой или свинцовой фольги, а также из пергамента и бумаги. Фольговые и пергаментные кружки имеют толщину 0,05...0,08 мм.

Рецептура ударного состава капсюлей, его количество и качество должны отвечать следующим требованиям:

- достаточная чувствительность к удару или наколу;
- высокая воспламеняющая способность;

- безопасность в служебном обращении с боеприпасами; отсутствие химического взаимодействия между отдельными компонентами состава и его стойкость при хранении;
- химическая инертность по отношению к металлическим элементам капсюля;
- отсутствие вредного воздействия продуктов разложения ударного состава на поверхность канала ствола и окружающую среду.

В зависимости от технических условий в ударные составы могут входить регулирующие примеси, повышающие температуру пламени и создающие форс огня с раскалёнными твёрдыми частицами; сенсибилизаторы, повышающие чувствительность составов к удару или наколу; флегматизаторы, понижающие чувствительность ударных составов; связывающие вещества, улучшающие сыпучесть и технологичность при дозировании составов.

В патронном производстве чаще всего применяют гремучертутно-хлоратные составы, состоящие их трёх компонентов: гремучей ртути Hg(ONC)2 (инициатор), хлората калия KClO3 (окислитель) и антимонита Sb2S3 (горючее). Рецептура некоторых составов приведена в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Рецептура гремучертутнохлоратных ударных составов, %

Капсюли-воспламенители	Hg(ONC)2	KClO3	Sb2S3
Револьверного патрона	25,0	37,5	37,5
Винтовочного патрона	16,0	55,5	28,5
Патроны миномётных выстрелов	35,0	40,0	25,0
Капсюльных втулок	25,0	37,5	37,5
Пистолетного и винтовочного патронов (германские)	22,5	40,0	37,5*
Трубочные	25,0	37,5	37,5
Трубочные	28,0	36,0	36,0
Трубочные	50,0	25,0	25,0**
Капсюль Жевело	50,0	33,0	17,0
Малокалиберного патрона	50,0	30,0	20,0

* В составе антимонита содержится измельчённое стекло.
** Антимонит гранулирован 4%-ным шеллачным лаком.

Гремучертутно-хлоратные ударные составы с антимонитом достаточно чувствительны к ударам, относительно безопасны в обращении, дают необходимый луч огня, стойки при хранении, что проверено длительным сроком их применения, просты в изготовлении и сравнительно дешевы.

Их недостатком является взаимодействие с металлом чашечек, что требует специальных защитных покрытий (лакирования, никелирования). Продукты их разложения негативно действуют на поверхность канала ствола, уменьшая

живучесть оружия. При сгорании ударного состава образуются газообразные и твёрдые продукты. К последним относятся хлорид калия KCl и перекись сурьмы Sb2S3. Они способствуют образованию сульфитов и сульфатов калия K2S03 и K2S04, твёрдые частицы которых образуют нагар, приводят к коррозии и эрозии поверхности канала ствола, в результате чего уменьшается живучесть стволов.

Одним из средств борьбы с коррозией является замена гремучертутно-хлоратных ударных составов другими некорродирующими (неоржавляющими). В качестве инициаторов в таких составах применяют тринитрорезорцинат свинца C6H(NO2)3O2PbH2O или динитродиазофенол C6H2(NO2)ON2. Эти вещества позволяют добиться хорошей воспламеняющей способности капсюлей. Недостаточная чувствительность к удару вызывает необходимость введения в состав сенсибилизатора (тетразена C2H8ON10) в количестве 1…3%. В качестве окислителя применяется часто нитрат бария, а в качестве горючего – антимонит, алюминий, цирконий, ферросилиций и др. Некоторые рецептуры неоржавляющих ударных составов приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Рецептуры неоржавляющих ударных составов, %

Компоненты	Варианты рецептур							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Диазодинитрофенол	—	—	—	—	—	—	—	16,5
Динитрорезорцинат свинца	—	—	50	—	—	—	—	—
Тринитрорезорцинат свинца	50	30	—	38,5	40	25	11,2	18,7
Тетразен	1,5*	1,5*	2*	3	—	1,5	2,3	—
Нитрат бария	45	49	40	38,5	35	45	73,6	44,8
Двуокись свинца	—	—	—	—	5	—	—	—
Силицид кальция	—	—	—	—	20	5,5	—	—
Алюминий	5	—	10	—	—	—	4,8	—
Цирконий	—	21	—	—	—	23	—	—
Антимонит	—	—	—	10	—	—	8,1	20,0
Ферросилиций	—	—	—	10	—	—	—	—

* Сверх 100%.

Дозы ударного состава в патронных капсюлях-воспламенителях находятся в пределах 0,02...0,03 г в зависимости от мощности капсюля. В трубочных капсюлях доза составляет в среднем 0,13 г (у мощных до 0,2 и маломощных до 0,03 г). Давление прессования состава обычно достигает 1100…1400 кгс/см^2, что обеспечивает необходимую прочность состава и достаточную чувствительность к удару.

В табл. 3.5 приведены обозначения капсюлей-воспламенителей, применяемых в отечественной практике патронного производства.

Таблица 3.5

Обозначение капсюлей-воспламенителей

Обозначение	Индекс	Принадлежность	Примечание
КВ-10	инд.7КВ2	Пистолетные патроны 5,45 мм	С гладкой запрессовкой состава
КВ-16	инд.7КВ1	Автоматные патроны 5,45 мм	
КВ-24	инд.57-К-210	Патроны обр.43 г.7,62 мм	
КВ-26	инд.57-К-121	Пистолетные патроны 7,62 мм и 9 мм	
КВ-27	инд.57-К-011	Винтовочные патроны 7,62 мм	
КВ-25	инд.57-К-501	Крупнокалиберные патроны 12,7 мм и 14,5 мм	С фигурной запрессовкой состава

Чувствительность патронных капсюлей-воспламенителей к удару зависит от чувствительности инициатора, процентного соотношения и степени измельчения компонентов; величины давления прессования состава, толщины дна чашечки и покрытия; механических характеристик материала чашечки и покрытия; глубины посадки капсюля в капсюльное гнездо; формы и размеров наковальни; формы, размеров и выхода бойка; силы боевой пружины.

Из-за большого числа факторов, влияющих на чувствительность, надёжной оценкой её может служить только опытное определение, которое производят на специальных копрах. Чувствительность каждого вида капсюлей характеризуют верхним и нижним пределом чувствительности.

Нижним пределом чувствительности (пределом безопасности) считают ту максимальную высоту, при падении с которой груза определённого веса на капсюль ещё не происходит воспламенение состава. Предел безопасности не допускает воспламенения капсюлей в процессе производства, транспортировки и применения патронов в условиях значительных сотрясений.

Верхним пределом чувствительности (пределом безотказности) считают минимальную высоту, при падении с которой такого же груза все капсюли воспламеняются. Предел безотказности определяет уровень стабильности действия капсюлей при минимальной силе боевой пружины в оружии.

Для испытания капсюли вставляют в гильзы, удовлетворяющие чертежам и техническим условиям. Бойки для разбития капсюлей также должны удовлетворять требованиям чертежей и ТУ. Для проведения опытов груз устанавливают на верхнем или нижнем пределе высоты по техническим условиям.

При разработке новых капсюлей-воспламенителей или при изменении материалов и технологии изготовления существующих капсюлей, а также для периодического контроля строят кривые чувствительности (рис. 3.7).

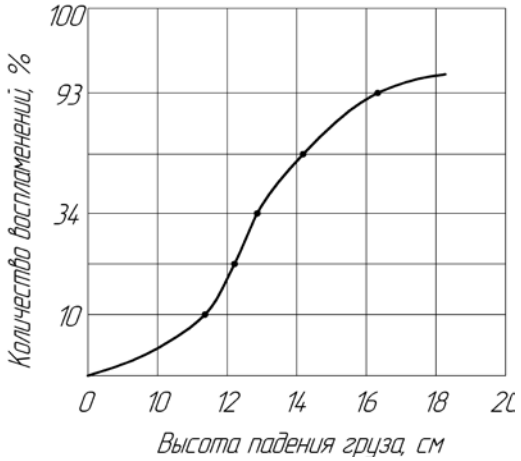


Рис. 3.7. Кривая чувствительности капсюлей

Опыты проводят при установке груза на различных высотах в диапазоне нижнего и верхнего пределов. Для каждой высоты испытывается одинаковое количество капсюлей, например 100 шт. Верхний и нижний пределы грузов закрепляют двойным количеством испытываемых капсюлей. По полученным данным строится график с координатами «высота падения груза–процент воспламенения капсюлей». Кривые чувствительности являются средством производственного контроля капсюлей и технологии их изготовления.

Кривые строятся для каждой десятой партии, но не реже одного раза в месяц. При повседневных контрольных испытаниях капсюлей-воспламенителей ограничиваются определением верхних и нижних пределов. Например, для капсюлей винтовочных патронов установлен груз 307±1 г, нижний предел с допускаемым числом воспламенений капсюлей до 0,5% принят равным 10 см, а верхний предел с числом допускаемых осечек 0,5% – 35 см. Для испытания капсюлей крупнокалиберных патронов принят тот же груз, а крайние пределы равны соответственно 10 и 45 см.

Аналогичным образом определяют чувствительность трубочных капсюлей-воспламенителей, только в качестве бойка используют стандартное жало, изготовленное из незакалённой стали с содержанием углерода 0,8... 1,2%.

На чувствительность к наколу обычно испытывают по 100 капсюлей-воспламенителей для каждого предела высоты. Требования чувствительности трубочных капсюлей к наколу таковы: вес груза 200 г, нижний предел высоты 0,5 см, верхний предел 4…6 см с числом допускаемых воспламенений (отказов) до 1%.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАТРОНОВ

4.1. Структура технологических процессов изготовления патронов

Структура технологического процесса изготовления патрона в целом определяется схемой его сборочного состава и, соответственно, последовательностью общей и узловой сборки (рис. 4.1). Эта схема, являясь первым этапом разработки технологического процесса, в наглядной форме отражает технологический маршрут сборки патрона и его составных частей – сборочных единиц. Технологические схемы сборки составляют на основе сборочных чертежей изделия. При наличии образца изделия составление технологических схем облегчается. В этом случае наивыгоднейшая последовательность сборки может быть установлена путем его пробной разборки. Элементы, снимаемые в неразобранном виде, представляют собой части изделия, на которые далее составляют технологические схемы узловой сборки. Детали, снимаемые отдельно, являются элементами, непосредственно входящими в общую сборку изделия. При определении последовательности сборки анализируют и размерные цепи изделия. На последовательность сборки влияют функциональная взаимосвязь элементов изделия, конструкция базовых элементов, условия монтажа силовых и легко повреждаемых, а также взрывоопасных элементов, их размеры и масса.

По принятым технологическим схемам узловой и общей сборки выявляют основные, подготовительные и вспомогательного назначения технологические операции. Последовательность выполнения операции сборки назначают на основе схемы сборочного состава (рис. 4.2), соблюдая следующие требования:

1) предшествующая операция не должна затруднять выполнение последующих операций;

2) при поточной сборке разбиение процесса на операции должно производиться с учетом темпа сборки;

3) после операций, при выполнении которых может появиться брак, необходимо вводить контрольные операции по его устранению.

Технологические процессы изготовления патронов включают в себя:

1) основные технологические процессы;

2) неосновные, вспомогательного назначения.

Группа основных технологических процессов, в соответствии с рассмотренными технологическими схемами общей и узловой сборки патронов (рис. 4.1), подразделяется на три подгруппы процессов:

- изготовления металлических деталей (элементов) патронов;
- изготовления неметаллических элементов патронов;
- сборки (монтажа) пуль и снаряжения патронов.

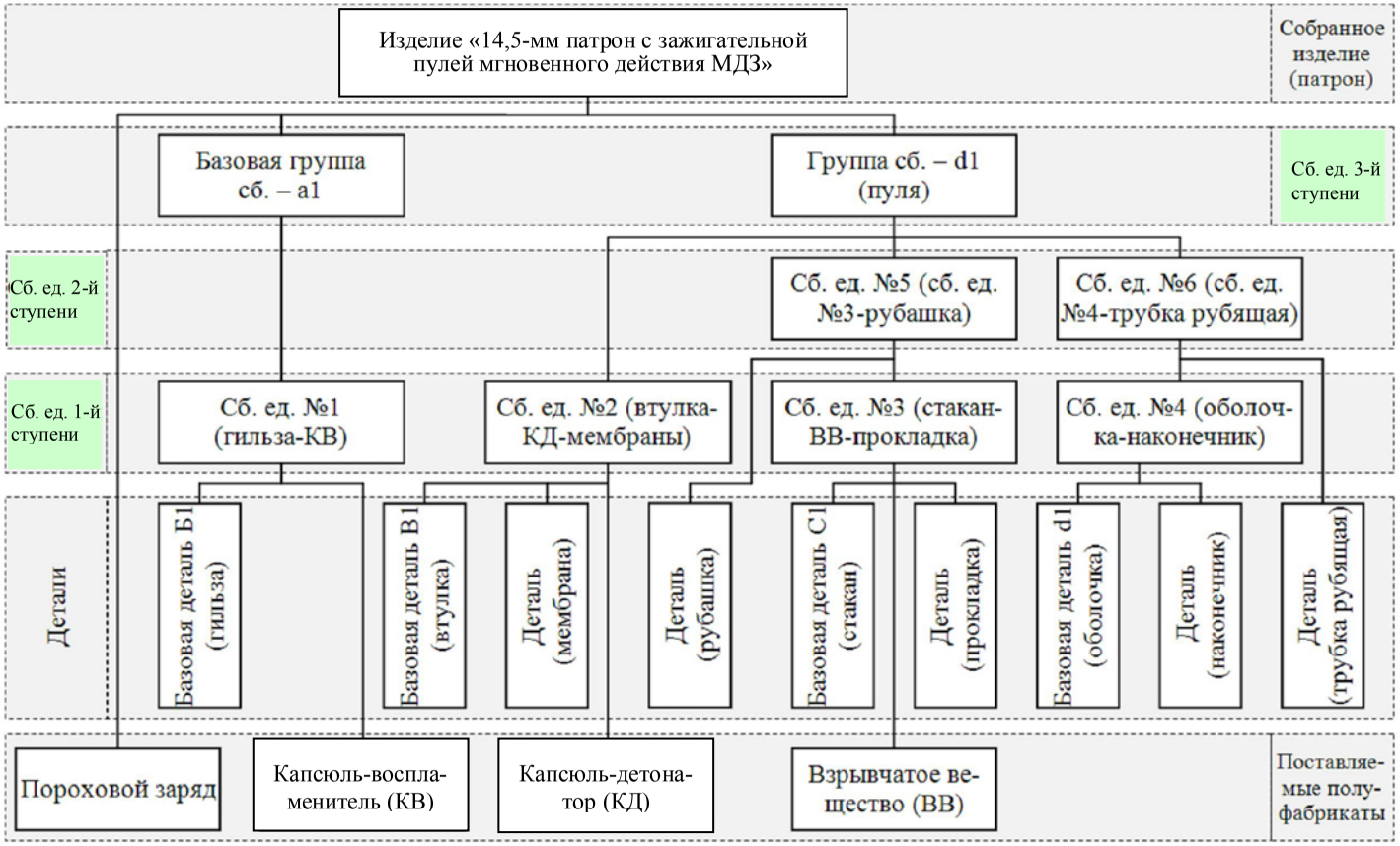


Рис. 4.1. Технологическая схема общей и узловой сборки патрона с выделением базовых компонентов : сб. – сборочная единица; ст. сб. – ступень сборки

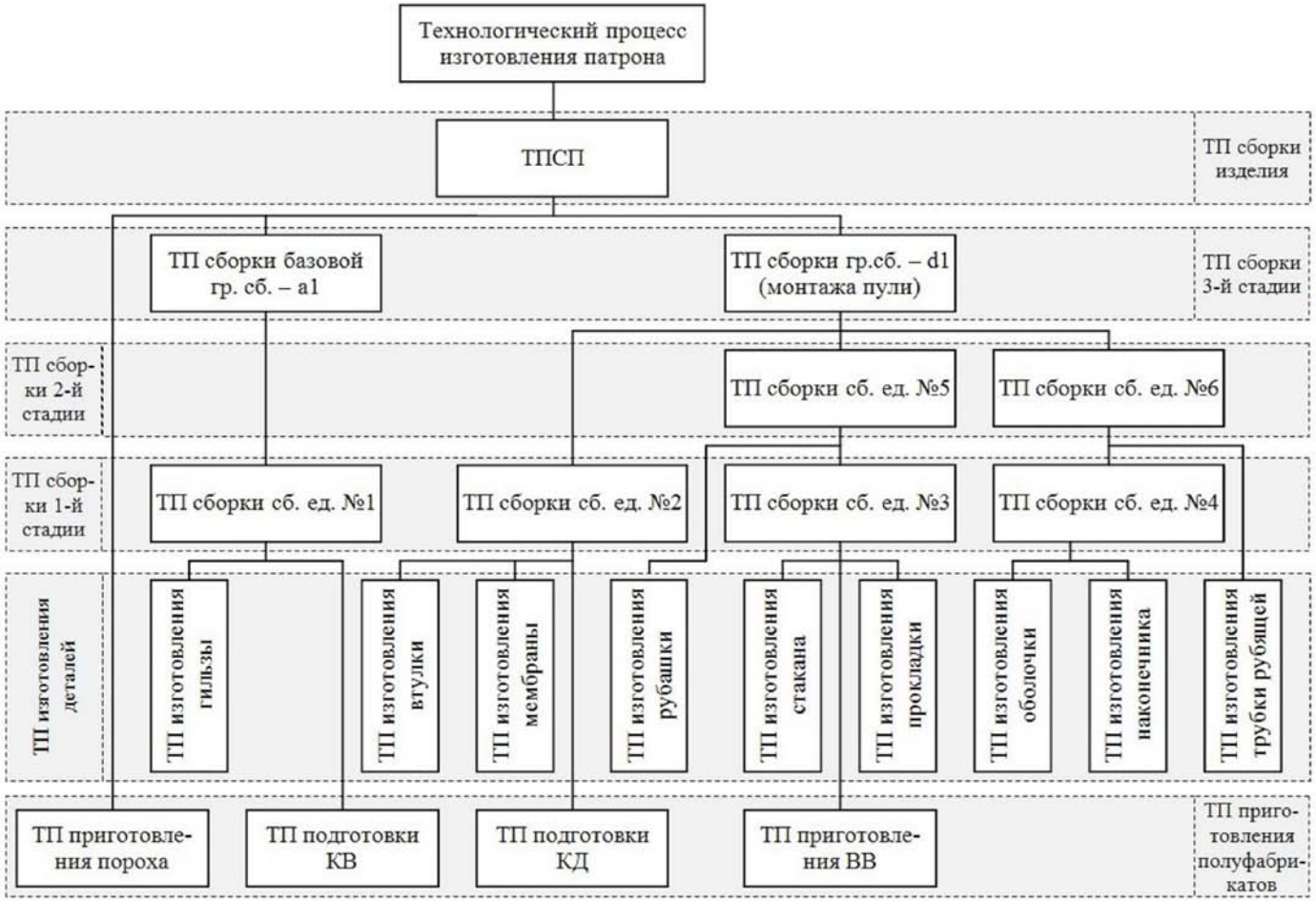


Рис. 4.2. Структура технологического процесса изготовления патрона

Подгруппа технологических процессов изготовления металлических элементов по их функциональному назначению разделяется на процессы изготовления гильз, пульных оболочек, сердечников, рубашек и прочих металлических элементов (пиростаканов, втулок, колпачков, трубок рубящих, прокладок и др.).

К подгруппе технологических процессов изготовления неметаллических элементов патрона относятся:

- процессы приготовления порохов и пиротехнических составов;
- процессы изготовления элементов патронов из конструкционных неметаллических материалов – заменителей металлических материалов.

В подгруппу технологических процессов сборки входят:

- процессы сборки (монтажа) пуль и их сборочных единиц (узлов) различных ступеней;
- процессы сборки (снаряжения) патронов.

К группе вспомогательных технологических процессов относятся:

- процессы изготовления тары из металлических и неметаллических материалов для укупорки патронов;
- процессы укупорки патронов в тару.

4.2. Технологические процессы изготовления металлических элементов патронов

4.2.1. Классификация технологических процессов

При проектировании и сопровождении технологического процесса технолог должен иметь четкое представление о его назначении и свойствах и способах решения задач по обеспечению требуемых свойств и качества патронов при его применении.

Следовательно, функция технологического процесса заключается в изготовлении изделия с заданным комплексом разнородных геометрических и физико-механических свойств из исходной заготовки (полуфабриката), что может быть представлено отображением

$$C_{0к} \to C_{пк},$$

где $C_{0к}, C_{пк}$ – векторы конструктивно-технологических параметров (КТП) исходной заготовки и детали соответственно; к – рассматриваемый уровень членения технологического процесса (например, уровень этапа – части процесса – совокупности некоторых операций, уровень операции или в целом процесса).

Получение такого вида изделий требует применения сложного многооперационного процесса с определенной структурой, ориентированной на использование разнородных по физической природе методов обработки. Рас-

члененность процесса характеризует совокупность трех его признаков: качества частей процесса, их количества и взаимного расположения (последовательности выполнения). Выбор способа расчленения процесса определяется типом решаемых функциональных технологических задач. В соответствии с разделением технологического процесса на отдельные операции общая функция расчленяется на ряд операционных функций ψ_i, заключающихся в преобразовании заготовки из одного промежуточного состояния (i–1-е) в другое (i-е):

$$\psi_i \cdot C_{i-1} \to C_i ,$$

где C_{i-1}, C_i – векторы конструктивно-технологических параметров обрабатываемой заготовки до и после выполнения i-й технологической операции.

Следовательно, системность и синтетический характер свойств технологических процессов проявляется в том, что эти свойства зависят как от свойств составляющих технологический процесс отдельных операций, так и от структуры процесса в целом.

На основании изложенного понятия структуры и логического отношения части и целого в иерархическую структуру технологического процесса изготовления металлического элемента (детали) патрона можно представить в виде (рис. 4.3).

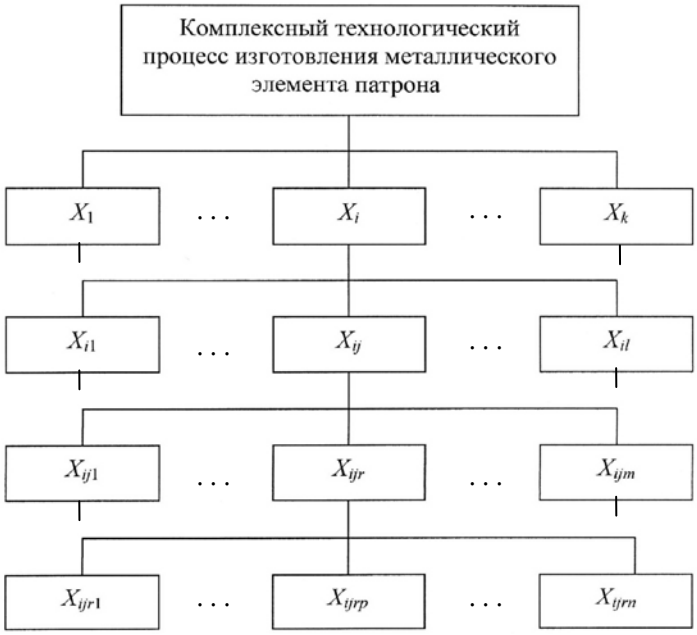


Рис. 4.3. Типовая структура технологического процесса изготовления металлического элемента патрона

В каждом из вертикальных рядов понятия размещаются снизу вверх по возрастающей степени обобщенности, от технологического перехода (первый, нижний уровень), технологической операции, технологического цикла и сложного цикла 4-го этапа технологического процесса (четвертый уровень). Единицей сходимости всех вертикальных рядов служит понятие «технологический процесс» (как целое). В горизонтальных рядах этой схемы размещаются понятия одного порядка.

Под технологическим циклом понимают совокупность операций по обработке заготовки, составляющих часть технологического процесса и выполняемых методом обработки давлением (холодной штамповки) и сопутствующими методами термической и химической обработки. Принимаем за начало отсчета простого цикла операцию по обработке давлением (холодной штамповке), а сразу за ней следуют термическая и химическая операции. Предполагается, что в пределах этого цикла происходит изменение и полное или неполное восстановление макро- и микроструктуры металла обрабатываемой заготовки, ее механических и некоторых физических свойств, а также состояния поверхности. В простом цикле операция холодной штамповки используется однократно, в сложном многократно. Сложный цикл делится на несколько простых и может быть поименован этапом.

Введение понятия технологического цикла облегчает понимание физических процессов, протекающих при реализации технологического процесса, его математическое моделирование и управление технологическим обеспечением формирования качества изделий. Для характеристики структуры процессов необходимо также учитывать количество материальных элементов, одновременно обрабатываемых при реализации технологического процесса. Тогда, с учетом рассмотренных понятий о технологических циклах, следует различать линейные, линейно-бинарные, циклические и смешанного типа технологические процессы. При линейной схеме процесса производится последовательная обработка одного металлического элемента. При бинарной схеме чередуются операции ввода в технологическую цепочку дополнительных элементов изделия в виде деталей или сборочных единиц – узлов, например при сборке патронов. Циклическая схема процесса предполагает возврат к предыдущим операциям, например термическим, для восстановления структуры металла заготовки, соответствующей требуемой исходной структуре.

В табл. 4.1 представлен в качестве примера типовой технологический процесс изготовления стальной гильзы к патрону образцы 43 г. клб. 7,62 мм с выделением основных этапов, технологических циклов, операций и указанием применяемых методов обработки.

Таблица 4.1

Структура технологического процесса изготовления стальной гильзы к патрону образцы 43 г. клб. 7,62 мм из листового проката

Этапы		Технологические циклы		Технологические операции		
№ пп	Содержание этапа	№ пп	Содержание цикла	№ пп	Метод обработки	Содержание (наименование) операций
1	2	3	4	5	6	7
1	Изготовление исходной сплошной заготовки (кружка)	1	Пластическая деформация - термическая обработка - химическая обработка	1	Холодная штамповка	Вырубка
				2	Термическая обработка	Отжиг
				3	Химическая обработка	Травление
				4		Промывка
				5		Фосфатирование
				6		Промывка
				7		Омыление
				8	Тепловая обработка	Сепарирование
				9		Сушка
				10		Охлаждение
2	Изготовление исходной полой заготовки	2	Пластическая деформация - термическая обработка - химическая обработка	11	Холодная штамповка	Свертка
				12		Вытяжка с утонением
				13	Термическая обработка	Отжиг
				14		Охлаждение
				15	Химическая обработка	Травление
				16		Промывка
				17		Фосфатирование
				18		Промывка
				19		Омыление
				20	Тепловая обработка	Сепарирование
				21		Сушка
				22		Охлаждение
3	Предварительное формообразование стенки детали	3.1	Пластическая деформация - химическая обработка	23	Холодная штамповка	Вытяжка с утонением
				24		Обрезка
				25		Вытяжка с утонением
				26		Обрезка
				27	Химическая обработка	Обезжиривание
				28		Промывка
				29		Промывка
				30	Тепловая обработка	Сепарирование
				31		Сушка
				32		Охлаждение
4	Предварительное формообразование дна детали	4	Пластическая деформация	33	Холодная штамповка	Штамповка дна
				34		Штамповка дна
				35		Пробивка запальных отверстий
		5		36		Зачистка кромок

Окончание табл. 4.1.

1	2	3	4	5	6	7
4	Предварительное формообразование дна детали	5	Термическая обработка –химическая обработка	37	Термическая обработка	Отжиг края (дульца) заготовки
				38		Охлаждение
		3.2		39	Химическая обработка	Травление
				40		Промывка
				41		Промывка
				42		Омыление
5	Окончательное формообразование конструктивных элементов стенки	6	Пластическая деформация - химическая обработка - тепловая обработка	43	Холодная штамповка	Обжим
				44	Химическая обработка	Обезжиривание
				45		Промывка
				46	Тепловая обработка	Сушка
6	Окончательное формообразование конструктивных элементов дна детали	7	Механическая обработка резанием	47	Механическая обработка резанием	Обточка фланца
				48		Калибровка фланца
				49		Подрезка торца дульца
7	Нанесение антикоррозионных покрытий на поверхности детали	8	Химическая обработка - тепловая обработка	50	Химическая обработка	Обезжиривание
				51		Промывка
				52		Фосфатирование 1
				53		Фосфатирование 2
				54		Фосфатирование 3
				55		Промывка
				56		Пассивирование
				57	Тепловая обработка	Сепарирование
				58		Сушка
				59		Охлаждение
				60	Химическая обработка	Лакирование
				61	Тепловая обработка	Сушка
				62		Охлаждение

П р и м е ч а н и е. Циклы 3.1 и 3.2 могут быть по своему физическому содержанию объединены в один цикл для краевой части заготовки, подвергаемой обжиму, так как штамповка дна не влияет на её свойства

На основании изложенного модель технологического процесса изготовления металлического элемента изделия представлена в виде следующего соотношения:

$$\text{ТП}_{\text{к}} = \left[\{C_{\text{пк}}\}, \{S_{\text{пк}}\}, \{Z_{\text{пк}}\}\right], \tag{4.1}$$

где $C_{\text{пк}}, S_{\text{пк}}, Z_{\text{пк}}$ – вектор конструктивно-технологических параметров изготавливаемого изделия, структура и вектор свойств (признаков) технологического процесса. Конструктивно-технологические параметры детали $C_{\text{пк}}$ устанавливаются по ее чертежу с учетом заданных технических требований по

технологическому классификатору металлических элементов патронов (см. п. 1.8). Поэтому технологические процессы изготовления металлических элементов патронов должны классифицироваться по признакам технологического классификатора (табл. 4.1). Примеры классификации и характеристики технологических процессов изготовления металлических элементов по конструктивно-технологическим признакам изготавливаемой детали:

1. Технологический процесс изготовления высокой (H/D до 4,0) полой ступенчатой детали (типа гильзы) с прямолинейными образующими ступеней, тонким дном и стенкой средней толщины ($S^{д}/H$ до 0,08, $S^{в}/H$ до 0,05), с заданными требованиями по точности, механическим свойствам, высокой степенью упрочнения $(HV/HV_0 > 2{,}0)$ и антикоррозионными свойствами из материала средней штампуемости типа стали 18ЮА $(\sigma_{0,2}/\sigma_{в} \le 0{,}65)$, средних габаритных размеров (d = 10 мм, H до 40 мм) и малой массы (m < 0,006 кг).

2. Технологический процесс изготовления удлиненной $(H/D > 5{,}0)$ полой ступенчатой детали (типа пульной оболочки) с прямолинейной и криволинейной образующими ступеней, стенкой средней толщины ($S^{в}/H$ до 0,06) и тонким дном ($S^{д}/H$ до 0,02), с заданными требованиями по точности, механическим $(HV/HV_0 = 1{,}0)$ и антикоррозионными свойствами из материала средней штампуемости (биметалла 3, $\sigma_{0,2}/\sigma_{в} \le 0{,}68$), средних габаритных размеров (D=13 мм, H=40 мм) и малой массы (m < 0,006 кг).

3. Технологический процесс изготовления высокой (H/D до 4,5) сплошной ступенчатой детали (типа сердечника) с прямолинейно-криволинейной образующей с заданными требованиями по точности, механическим свойствам (высокой степенью упрочнения ($HV/HV_0 \ge 2{,}0$)) из материала средней штампуемости (инструментальной углеродистой стали), средних габаритных размеров (D = 6,14 мм, H=28,5 мм) и малой массы (m < 0,006 кг).

Согласно принятой модели технологического процесса (4.1) его качественная и количественная характеристика задается совокупностью основных свойств, проявляемых и учитываемых при проектировании в подсистеме технологической подготовки производства и собственно производства, которые могут служить дополнительными признаками классификации технологических процессов.

К этим признакам следует отнести:

- тип производства;
- степень универсальности процесса;
- степень прогрессивности процесса;
- вид и способ получения исходной заготовки;

- основные методы и способы формирования механических свойств материала детали;
- тип применяемого технологического оборудования;
- степень механизации и автоматизации технологического процесса.

По типу производства различают технологические процессы для единичного, серийного и массового производств.

По степени универсальности выделим единичные, типовые и групповые технологические процессы. Единичный процесс предназначен для изготовления изделия одного наименования, типоразмера и исполнения, независимо от типа производства. Типовой технологический процесс – это процесс изготовления группы деталей с общими конструктивно-технологическими признаками, определяющими их технологическое подобие. Типовой процесс служит информационной основой для разработки единичных процессов. Групповой технологический процесс есть также процесс изготовления группы деталей, но, в отличие от типового, он предназначен для изготовления не деталей в целом, а только их одинаковых конструктивных элементов (пазов, отверстий, фланцев и т.п.) на универсальной технологической оснастке. По степени прогрессивности, степени использования в технологических процессах новых прогнозируемых методов и способов обработки различают рабочие процессы, ориентированные на применение известной традиционной технологии и оборудования, и перспективные, принципиально новые прогрессивные процессы.

По виду применяемых материалов и способам получения исходных заготовок целесообразно различать технологические процессы изготовления металлических элементов патронов из компактных (сплошных) и дискретных (порошковых) материалов. Для изготовления металлических элементов патронов в основном применяют компактные материалы в виде листового проката (полос, лент и труб) и сортового проката (прутков, проволоки). Ограниченное применение для изготовления бронебойных сердечников имеют порошковые материалы – металлокерамические твердые сплавы. По способу получения исходных сплошных и полых заготовок можно выделить процессы с получением заготовок из листового проката, например, способами отрезки, вырубки–редуцирования, вырубки, вырубки–вытяжки в штампах на прессах; из прутков – отрезкой в штампах на прессах, холодно-высадочных автоматах, периодической плоско-клиновой и поперечно-винтовой прокаткой.

В зависимости от вида применяемых методов формообразования деталей выделяют технологические процессы листовой, объемной, объемно-листовой штамповки, обработки резанием и комплексной обработки с использованием в одном процессе различных методов.

По виду методов обработки, применяемых при формировании структуры и механических свойств материала детали, выделены следующие группы технологических процессов:

- с деформационным упрочнением;
- с термическим упрочнением (закалкой и отпуском);
- с деформационным упрочнением и дорекристаллизационным отжигом;
- с деформационным упрочнением и неполным рекристаллизационным отжигом;
- с деформационным упрочнением и полным рекристаллизационным отжигом;
- с деформационным упрочнением, закалкой и отпуском;
- с деформационным упрочнением, закалкой, отпуском, деформационным упрочнением.

По степени механизации и автоматизации можно различать процессы с единичной, неполной и полной комплексной механизацией (автоматизацией).

По типу применяемого технологического оборудования различают процессы с использованием раздельного прессового, станочного оборудования, автоматических роторных (АРЛ) и роторно-конвейерных линий (РКЛ) линий, агрегатов (нагревательных печей и др.) и различных комбинаций этого оборудования.

4.2.2. Технологические процессы изготовления гильз и пиростаканов

Технологические процессы изготовления гильз относятся к наиболее сложным и трудоемким в патронном производстве. Главное влияние на технологичность конструкции детали, построение технологического маршрута ее изготовления и технико-экономические показатели процесса оказывают, согласно технологическому классификатору (п.п. 1.7,1.8), следующие конструктивно-технологические параметры детали:

- основные безразмерные геометрические параметры (относительная высота H/D, минимальная относительная толщина стенки S/D, относительная толщина дна $S^{д}/H$ ($S^{д}/D$) перепад диаметров (отношение минимального диаметра детали к максимальному) d/D;
- обрабатываемость – штампуемость материала детали ($\sigma_{0,2}, \sigma_{0,2}/\sigma_{в}$, $HV, \varepsilon_{iy}, \varepsilon_{ip}$);
- требуемая степень упрочнения материала в заданных контрольных сечениях $HV/HV_0, \sigma_{в}/\sigma_{в0}$;
- габаритные размеры (*H,D*) и масса детали ($M_{д}$).

При прочих равных условиях с увеличением H/D, уменьшением S/D, увеличением $S^{д}/H$ ($S^{д}/D$), уменьшением d/D, увеличением $\sigma_{0,2}, \sigma_{0,2}/\sigma_{в}$, уменьшением характеристик пластичности $\varepsilon_{iy}, \varepsilon_{ip}, \psi, \delta$, увеличением требуе-

мой степени упрочнения HV/HV_0, габаритов и массы детали технологичность ее конструкции снижается, увеличивается количество основных, подготовительных и вспомогательного назначения технологических операций.

Существенное влияние на количество штамповочных операций и сопутствующих им подготовительных термических и химических операций оказывает вид – марка – материала.

Применяемые для изготовления гильз сталь 18ЮА и биметалл-1 на основе стали 18ЮА и стали 18кп характеризуются средней штампуемостью, но при изготовлении биметаллических гильз отпадает необходимость в применении сложной химической обработки заготовок по нанесению технологического покрытия (фосфатирования) и готовых деталей по нанесению антикоррозионного покрытия (лакирования) (табл. 4.2).

Латуни марок Л68, Л70 обладают более высокой штампуемостью по сравнению со сталью 18ЮА и биметаллом 1, что может способствовать сокращению числа штамповочных операций и также не требует сложной химической обработки.

Таблица 4.2

Маршрутный технологический процесс изготовления 9-мм гильзы (материал – биметалл 1 ОСТ 3-6648-91)

№пп	Технологическая операция	Технологическое оборудование	Габаритные размеры заготовки	
			Диаметр *D*, мм	Высота *H*, мм
1	2	3	4	5
1	Вырубка заготовки	Пресс ПВ 100/800	17,25	2,9
2	Рекристаллизационный отжиг	Печь ОКБ-355	17,25	2,9
3	Химическая обработка: химическое травление промывка двойная противоточная омыление сепарирование сушка охлаждение	Термохимическая линия ЛТ-ШБ	17,25	2,9
4	Вытяжка исходной полой заготовки: свертка-вытяжка 1 вытяжка 2 отжиг охлаждение	АРЛ М-ЛГ-1-56р	11,39	16,3
5	Химическая обработка: химическое травление промывка двойная противоточная омыление сепарирование сушка охлаждение	Термохимическая линия ЛТ-ШБ	11,39	16,3

Окончание табл. 4.2

1	2	3	4	5
6	вытяжка 3 обрезка вытяжка 4	АРЛ М-ЛГ-2-56р	9,82	39,6
7	Химическая обработка: химическое обезжиривание промывка двойная противоточная сушка охлаждение	Термохимическая линия ЛОС-Ш	9,82	39,6
8	Штамповка дна: штамповка 1 контроль наличия капсюльного гнезда штамповка 2 контроль глубины до вершины наковальни контроль диаметра капсюльного гнезда пробивка запальных отверстий зачистка кромок контроль наличия запальных отверстий	АРЛ 1ЛГ-305	9,92	39,6
9	Обрезка	АРЛ М-ЛГ-2-56р	9,92	19,0
10	Химическая обработка: химическое обезжиривание промывка двойная противоточная промывка сушка охлаждение	Термохимическая линия ЛОС-Ш	9,92	19,0
11	Механическая обработка гильзы: обточка фланца калибровка фланца подрезка дульца контроль высоты фланца контроль диаметра проточки контроль длины	АРЛ М-ЛМОГ-56	9,92	18,06
12	Химическая обработка: химическое обезжиривание промывка двойная противоточная фосфатирование 1 фосфатирование 2 фосфатирование 3 промывка пассивирование двойное противоточное сепарирование сушка охлаждение	Термохимическая линия ЛФ-Ш	9,92	18,06
13	Лакирование проточки гильзы: лакирование проточки сушка визуальный контроль	Линия ЛГП-107	9,92	18,06

На начальные этапы технологического процесса влияют вид используемого проката (листовой, сортовой), форма исходных сплошной и полой заготовок и способ их получения.

При применении листового проката исходные сплошные заготовки могут иметь форму кружка, квадрата, прямоугольника. Кружки получают способами вырубки в штампах, заготовки квадратной и прямоугольной формы – способами малоотходной многорядной отрезки в штампах.

Исходные полые заготовки из листового проката изготавливают способами: а) вырубки–свертки в комбинированном штампе совмещенного действия; б) свертки; в) свертки–выдавливания в комбинированном штампе совмещенного действия.

Применение плоских квадратных заготовок и способа их свертки (вытяжки)–выдавливания позволяет значительно повысить коэффициент использования металла и интенсифицировать технологический процесс, например, при изготовлении пиростаканов (табл. 4.3, рис. 4.4).

Таблица 4.3

Маршрутный технологический процесс изготовления пиростакана из биметалла 1

№ пп	Технологическая операция	Технологическое оборудование
1	2	3
1	Расправка пачек полос, осмотр и укладка полос в кассеты	Стол, кассета
2	Вырубка–свертка	Пресс вертикальный ВР-120
3	Отжиг	Печь ОКБ-355
4-7	Травление, промывка, омыление, сушка	Агрегат АТ-2
8	Вытяжка–выдавливание	Станок Ш-71
9	Обрезка фланца	Пресс горизонтальный О-81
10	Отжиг	Печь ОКБ-355
11-14	Травление, промывка, омыление, сушка	Агрегат АТ-2
15	Вытяжка с утонением	АРЛЛСТ-214
16	Обрезка-1	АРЛЛСТ-214
17	Штамповка дна	АРЛЛСТ-214
18	Обжим конуса	АРЛЛСТ-214
19	Обрезка-2	Станок ОШ-41
20	Калибровка	Станок ОШ-41
21-24	Обезжиривание, промывка, омыление, сушка	Агрегат 1АОС-1М
25	Контроль	Станок СА-41

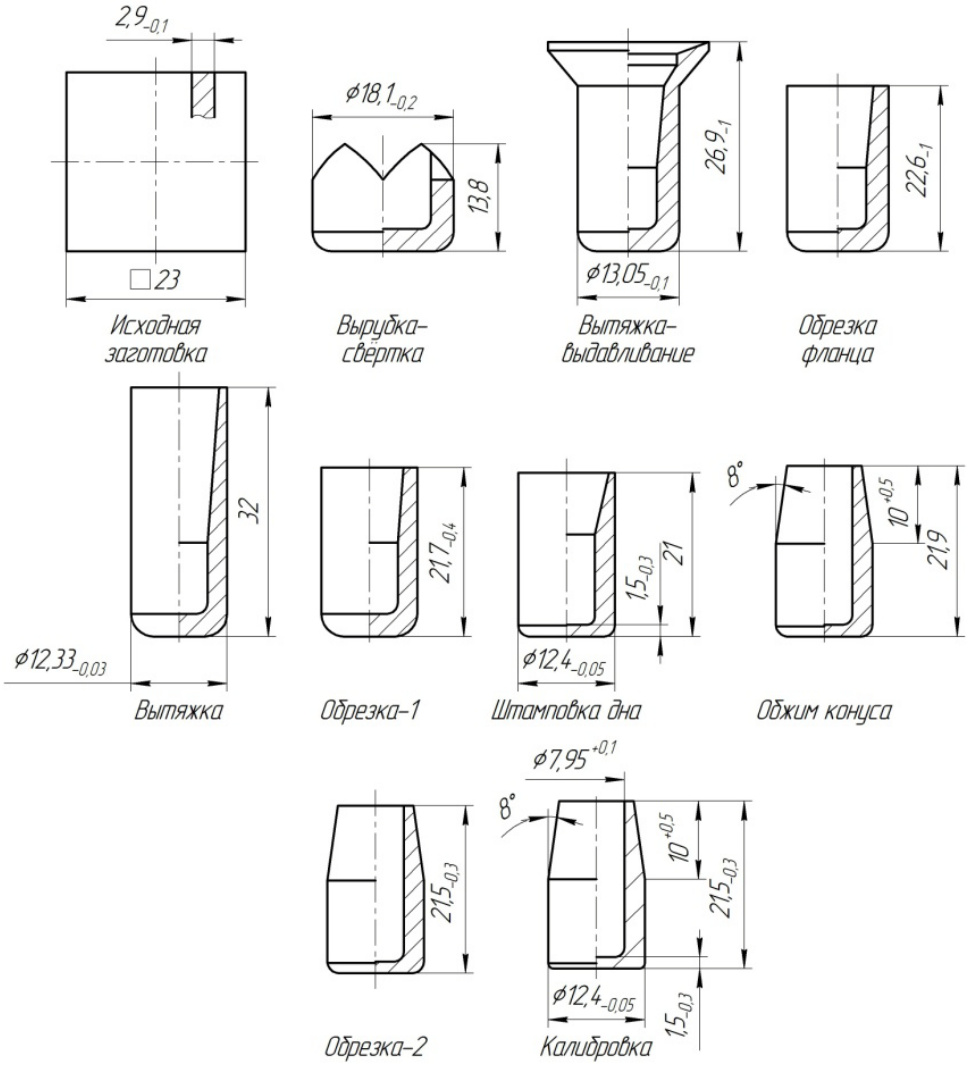


Рис. 4.4. Эскизы заготовок пиростакана после выполнения штамповочных операций

При использовании в качестве полуфабрикатов прутков исходная сплошная заготовка изготавливается способами отрезки и калибровки в штампах, а полая заготовка – способами холодного выдавливания (продольного или продольно-поперечного выдавливания) (табл. 4.4).

Таблица 4.4

Маршрутный технологический процесс изготовления полой заготовки стальной гильзы с применением способа холодного выдавливания

№ пп	Технологическая операция	Технологическое оборудование	№ пп	Технологическая операция	Технологическое оборудование
1	Отрезка	Пресс КБ-262	10	Омыление	Термохимическая линия ЛТ-ШР
2	Контроль качества заготовок		11	Сушка Охлаждение	
3	Калибровка	Пресс механический 8445	12	Продольное выдавливание	Пресс механический 8445
4	Контроль качества заготовок		13	Отжиг	Печь ОКБ-355
5	Отжиг	Печь ОКБ-355	14	Травление	Термохимическая линия ЛТ-ШР
6	Травление	Термохимическая линия ЛТ-ШР	15	Промывка	
7	Промывка		16	Фосфатирование	
8	Фосфатирование		17	Промывка	
9	Промывка		18	Омыление	
			19	Сушка Охлаждение	

Так как гильза представляет собой конструкцию полой ступенчатой детали с переменной по ее высоте толщиной стенки и наружным диаметром, то основными способами формообразования стенки и ее конструктивных элементов (дульца, ската и корпуса) служат вытяжка с утонением через одну или две матрицы и продольный обжим в штампах. Формообразование конструктивных элементов дна гильз, как правило, выполняется за две операции объемной штамповки, а пиростаканов и втулок – за одну.

4.2.3. Технологические процессы изготовления пульных оболочек

На построение технологического процесса изготовления пульной тонкостенной оболочки влияют следующие факторы:

- конструктивное исполнение;
- вид исходного полуфабриката и марка материала;
- вид исходных заготовок и способ их получения;
- основные конструктивно-технологические параметры;
- основной способ формообразования.

По конструктивному исполнению оболочки могут быть:

1) полузакрытого типа, с открытой хвостовой частью и закрытой головной, оживальной, частью, цельноштампованные;

2) полузакрытого типа, с открытой хвостовой частью и закрытой запрессованным в отверстие головной части наконечником, сборной конструкции;

3) полузакрытого типа с закрытой хвостовой и открытой головной частью, цельноштампованные;

4) открытого типа с хвостовой и головной частью.

Оболочки первого типа наиболее широко применяют для изготовления оболочечных пуль, оболочки второго типа ограниченно применяются для изготовления пуль типа МДЗ. Оболочки третьего и четвертого типов применяются при изготовлении экспансивных пуль.

В качестве исходных полуфабрикатов в основном применяется листовой прокат (полосы, ленты) из биметалла 3 и сталей 11кп, 11ЮА. Принципиально возможно применение для изготовления оболочек второго и четвертого типов трубных заготовок из сталей. Соответственно в качестве исходных сплошных заготовок, получаемых из листового проката, могут быть плоские круглые и плоские шестигранные формы заготовки. Основными способами получения таких заготовок являются многорядная вырубка и отрезка в штампах.

Исходные полые листовые заготовки изготавливают способами вытяжки, вырубки–вытяжки, вытяжки-выдавливания.

Основными способами предварительного формообразования оболочки – цилиндрической заготовки – служат процессы вытяжки с утонением, комбинированные и ступенчатой вытяжки.

Основными способами формообразования оживальной части оболочек служат комбинированные процессы штамповки «вытяжка–раздача–выдавливание вершинки», «раздача–выдавливание вершинки», на производстве именуемые неточно обжимом.

В табл. 4.5 дан пример маршрутного технологического процесса изготовления стальной пульной оболочки первого типа, а на рис. 4.5 показаны эскизы заготовок оболочки после штамповочных операций.

Таблица 4.5

Маршрутный технологический процесс изготовления стальной пульной оболочки первого типа

№ пп	Технологическая операция	Технологическое оборудование
1	2	3
1	Наружный осмотр, контроль размеров полос	Стол
2	Смазка полос	Стол
3	Вырубка-свертка	Пресс ВР – 20
4-6	Обезжиривание, промывка, сушка	Агрегат АОС-1
7	Отжиг	Электропечь ОКБ – 355
8-11	Травление, промывка, сушка, охлаждение	Агрегат М-АГ-2
12-16	Латунирование 1, промывка, пассивирование, промывка, сушка	Ванна гальваническая. Агрегат химической обработки
17	Осмотр	Стол
18-21	Вытяжка -1, вытяжка-2, вытяжка-3, вытяжка-4	АРЛ 10-21414
22	Отжиг	Электропечь ОКБ – 355

Окончание табл. 4.5

1	2	3
23-27	Травление, промывка, омыление, сушка, охлаждение	Агрегат М-АГ – 2
28-32	Обжим-1, обжим-2, обжим уступа, калибровка, обрезка	АРЛ 10-314
33	Осмотр	Стол
34	Расправка (раздача)	Пресс ПО – 51
35-41	Латунирование-2, промывка, пассивирование, промывка, нейтрализация, промывка, сушка	Ванна гальваническая. Агрегат химической обработки
42	Осмотр	Станок С1 - 41

Операция «латунирование-1» предназначена для нанесения металлического технологического покрытия, которое в сочетании с мыльной эмульсией служит надежной смазкой и одновременно защищает заготовки от коррозии при межоперационном хранении. Операция «латунирование-2» предназначена для нанесения антикоррозионного покрытия на готовую деталь.

Вариантом этой технологии изготовления оболочки может служить процесс с заменой операции «латунирование-1» на фосфатирование с сопутствующими операциями (см. табл. 4.1) и операции «латунирование-2» на операцию по нанесению антикоррозионного фосфатно-лакового покрытия.

В данном процессе формообразование оживальной части пульной оболочки осуществляется способом ступенчатой вытяжки за две операции. На операции «обжим-1» изготавливается по схеме комбинированной вытяжки заготовка ступенчатой формы, а на операции «обжим-2» формуется оживальная часть по схеме «вытяжка–раздача» (рис. 4.5) [2].

При изготовлении оболочки второго типа, сборной конструкции, с запрессовкой томпакового наконечника в отверстие в вершине оболочки, по сравнению с рассмотренной маршрутной технологией после операции "обжим-2" вводятся следующие дополнительные формоизменяющие операции:

- пробивка отверстия в вершине;
- фрезерование-1;
- калибровка-1;
- фрезерование-2;
- калибровка-2;
- вставка и запрессовка-1 наконечника в оболочку;
- запрессовка-2 наконечника в оболочку;
- контроль толщины вершины наконечника в оболочке.

При применении для изготовления пульных оболочек материала "Биметалл-3" исключается из технологической цепочки операции "латунирование-1", "латунирование-2", фосфатирование промежуточное, операции по нанесению фосфатно-цинкового покрытия.

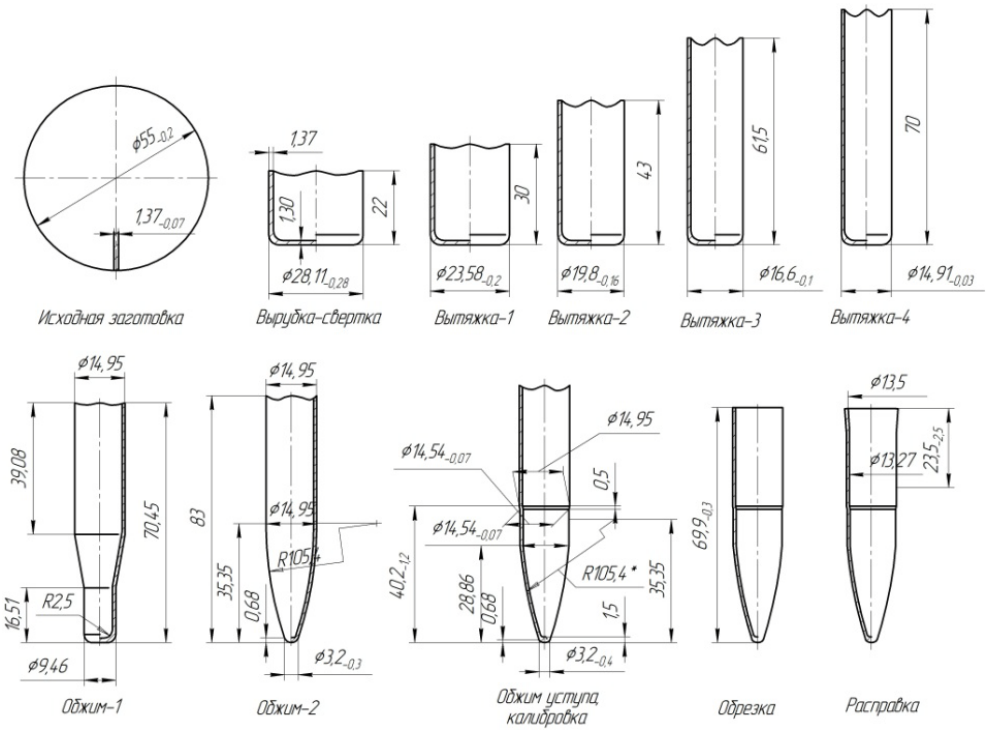


Рис. 4.5. Эскизы заготовок пульной оболочки после выполнения штамповочных операций

Технологический процесс изготовления оболочки третьего типа с закрытой хвостовой и открытой головной частью содержит примерно те же технологические операции для получения полой цилиндрической заготовки с дном способами вытяжки, а формообразование оживальной части будет выполняться на штампосборочной операции "обжим пули", двухэлементной (оболочка–сердечник) или трехэлементной (оболочка–сердечник–рубашка).

Оболочка четвертого, открытого типа может изготавливаться по такой же технологии, но с пробивкой отверстия в дне заготовки после вытяжки.

Альтернативным вариантом технологии изготовления оболочки второго и четвертого типа может служить процесс, разработанный в БГТУ "Военмех" с использованием полых трубных заготовок (шовных и бесшовных). Этот процесс по сравнению с применяемыми традиционными процессами имеет следующие преимущества:

- высокий коэффициент использования металла;
- низкая трудоёмкость изготовления за счет исключения процессов вытяжки и применения одной операции обжима;
- сокращение количества штампового инструмента и технологического оборудования за счет исключения автоматической линии АРЛ для вытяжки.

В табл. 4.6 приведен вариант маршрутной технологии изготовления пульной оболочки второго типа к патрону крупного калибра.

Таблица 4.6

Маршрутный технологический процесс изготовления стальной пульной оболочки из трубной заготовки

№ пп	Технологическая операция	Технологическое оборудование
1	Входной контроль труб	---
2	Отрезка	Станок отрезки
3	Осмотр заготовок по срезу	Стол
4	Отжиг	Печь электрическая
5-12	Травление, промывка, фосфатирование. Промывка, омыление, сепарирование, сушка, охлаждение	Термохимическая линия
13	Обжим	Автоматическая роторная линия
14-16	Зачистка отверстия, калибровка и обрезка внутреннего уступа	
17	Фрезерование кромки отверстия	
18	Латунирование	Ванна гальваническая
19	Калибровка отверстия под наконечник	Автоматическая роторная линия
20-23	Вставка и запрессовка наконечника в оболочку контроль толщины вершинки	
24	Обрезка оболочки	
25-26	Раздача оболочки и обжим уступа	
27	Протирка	Барабан
28	Осмотр	Стол

4.2.4. Технологические процессы изготовления сердечников

Сердечники к пулям патронов стрелкового оружия относятся к классу сплошных стержневых деталей типа тел вращения с различной формой образующей. На технологичность конструкции сердечника и построение технологического процесса его изготовления наиболее существенное влияние оказывают:

- конструкция (форма);
- основные безразмерные геометрические параметры (относительная высота H/D, относительный минимальный диаметр головной части d/D, относительный радиус кривизны головной части R_p/D и (или) односторонний угол конусности головной и хвостовой части в отдельности);
- обрабатываемость, в частности штампуемость материала; требуемая степень упрочнения материала по отношению к его свойствам в отожженном состоянии: HRC/HRC_0.

Наименее технологичными конструкциями являются сердечники (высокие $H/D \geq 5{,}0$) ступенчатой формы, остроконечные, без притупления вершины, с криволинейной образующей при большом относительном радиусе кривизны

R_p/D>7,5, с высокой степенью упрочнения $HRC/HRC_0 \geq 2{,}0$, больших габаритов ($D \geq 10$, $H \geq 50$), средней и большой массы (≥ 0,015 кг) из материалов низкой штампуемости. Основными этапами технологического процесса изготовления этого типа деталей являются:

1) получение исходной сплошной цилиндрической заготовки из прутка (проволоки) способами волочения и последующей отрезки (отрубки) в штампе;

2) предварительное формообразование конструктивных элементов сердечника способами холодной штамповки (редуцирования, продольного выдавливания);

3) окончательное формообразование конструктивных элементов сердечника способами механической обработки резанием;

4) формирование структуры и механических свойств материала сердечника способами термической, термомеханической или химико-термической обработки.

В табл. 4.7 приведен технологический маршрут изготовления сердечника такого типа.

Таблица 4.7

Технологический маршрут изготовления остроконечного сердечника с криволинейной образующей из инструментальной углеродистой стали У12А

№пп этапа	№пп операции	Технологическая операция	Технологическое оборудование
1	2	3	4
1	1	Входной контроль	-
	2	Снятие заусенцев	Наждачный станок
	3	Отрезка (отрубка) заготовки	Пресс механический
	4	Контроль заготовок	-
	5	Протирка	Барабан протирки
	6	Контроль заготовок	Стакан калибровки
	7-15	Обезжиривание, промывка, травление, промывка, фосфатирование, сушка, охлаждение	Термохимическая химия
2	16-21	Загрузка, передача, штамповка первого (верхнего) конуса, штамповка второго (нижнего), контроль, промывка (протирка)	Автоматическая роторная линия. Агрегат промывки
3	22-25	Обточка, контроль, протирка, контроль	Специальный токарный полуавтомат. Барабан протирки, вентиляционная установка
4	26-30	Закалка, отпуск, контроль, протирка, контроль	Электропечь, цепочка ванн, станок осмотра
	Приемочный контроль ОТК		

Примечание: В технологический маршрут не включены операции контроля наладчиком и транспортные операции.

Изменение геометрии сердечника за счёт среза вершины ($d/D \approx 0{,}40$) при той же относительной высоте ($H/D \approx 5{,}0$) и больших относительный радиусах кривизны ($R_p/D > 7{,}5$), а также с уменьшением требуемой степени упрочнения до уровня $HRC/HRC_0 \approx 1{,}5$ позволяет изготавливать сердечники способами штамповки, без применения механической обработки резанием, из высокоуглеродистых конструкционных качественных сталей типа Ст 65Г, 70, 75. В табл. 4.8 приведен вариант такой технологии.

Таблица 4.8

Маршрутный технологический процесс изготовления стального сердечника, материал Ст 70 (70Г,75)

№пп этапа	№пп операции	Технологическая операция	Технологическое оборудование
1	1-3	Обезжиривание, травление, промывка	Ванна
	4-7	Волочение, контроль, отрезка, контроль	Волочильный станок, автоматическая линия
	8-14	Обезжиривание, травление, промывка, омыление, сепарирование, сушка, охлаждение	Автоматическая линия
	15	Контроль	
2	16-18	Штамповка первая, штамповка вторая, контроль	Автоматическая роторная линия
	19-20	Отжиг, контроль	Электропечь
3	21-23	Штамповка третья, штамповка четвертая, контроль	Автоматическая роторная линия
4	24-29	Закалка, охлаждение, промывка, отпуск, контроль, протирка	Линия термообработки сердечников

Высокой технологичностью характеризуются сердечники ступенчатые, конические, тупоконечные ($d/D \approx 0{,}6 \div 0{,}8$), изготавливаемые из низко- и среднеуглеродистых конструкционных качественных сталей, не требующих упрочняющей термообработки. Изготовление сердечников этого типа выполняется за два первых этапа технологического процесса, например:

1) травление, промывка проволоки, волочение первое и второе на волочильном станке, отрезка (отрубка) на автомате, травление, промывка, омыление, сушка в агрегатах для химической обработки, контроль;

2) штамповка предварительная и окончательная на автоматической роторной линии, протирка, контроль.

4.2.5. Технологические процессы изготовления рубашек

Основным материалом для изготовления рубашек служит свинец марок С1, С2,С3. В некоторых конструкциях пуль специального назначения предусматривается также применение алюминия марок АД0, АД1,АД00 и некоторых других.

Технологический процесс изготовления свинцовой рубашки реализуется за три этапа:

1) изготовление проволоки (плавка свинца в электропечи в чугунной ванне, прессование проволоки на гидравлическом прессе, выдержка проволоки в мыльной эмульсии);

2) изготовление исходной сплошной заготовки способами отрезки в штампе (инструментальном блоке АРЛ);

2) формообразование исходной полой заготовки способами холодного выдавливания (первая штамповка);

3) предварительное формообразование стенки детали способами холодного комбинированного выдавливания (вторая штамповка);

4) окончательное формообразование рубашки способами вытяжки и обрезки.

Этапы 2–5 могут реализоваться на автоматической роторной линии с выполнением, например, штампосборочных операций по сборке узла «сердечник–рубашка», вставки этого узла в оболочку и предварительной загибки (обжима) кромки оболочки.

При использовании алюминиевой проволоки с низким сопротивлением деформированию и высокими пластическими свойствами возможно применение той же технологии, что и для изготовления рубашек, за исключением ее первого этапа по изготовлению проволоки.

В случае применения в качестве исходного полуфабриката алюминиевой ленты рубашка изготавливается способами вытяжки без утонения и комбинированной вытяжки из плоской круглой заготовки, вырубаемой из ленты.

4.3. Технологические процессы приготовления пиротехнических составов

Технологический процесс производства пиротехнических составов состоит из двух этапов: подготовка компонентов и приготовление составов. Первый этап включает следующие операции: дробление или рыхление, сушку, измельчение, просеивание (рис. 4.6).

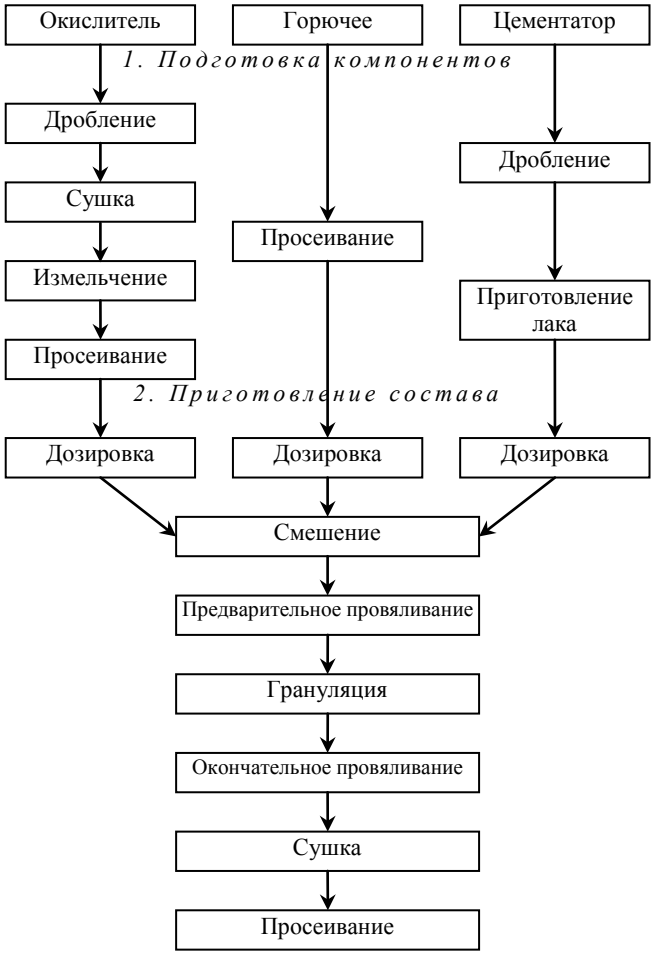


Рис. 4.6. Структура типового технологического процесса приготовления пиротехнического состава (вариант 1)

Количество необходимых операций на этапе подготовки компонентов зависит от свойств данного вещества. Окислители, обладающие малой чувствительностью к механическим импульсам и в то же время имеющие тенденцию к слеживанию, проходят все подготовительные операции (см. рис. 4.6).

Технологический процесс подготовки окислителей с высокой чувствительностью (например, перекиси бария), поступающих с завода-изготовителя в мелкокристаллической фракции, включает две операции, выполняемые последовательно: просеивание и сушка (рис. 4.7).

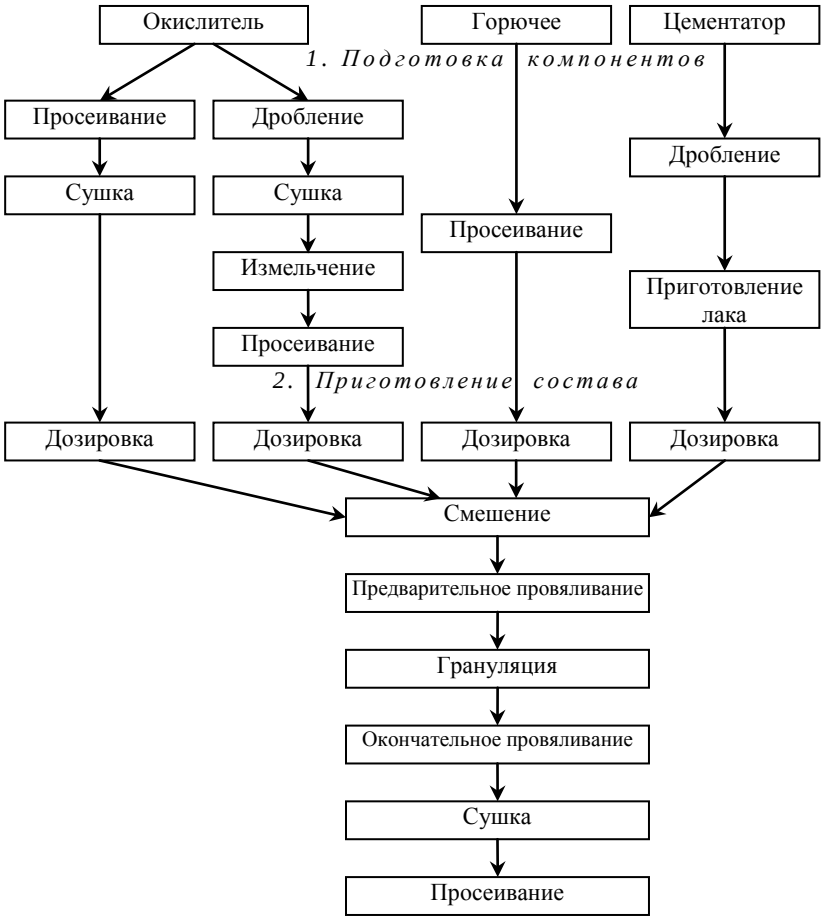


Рис. 4.7. Структура типового технологического процесса приготовления пиротехнического состава (вариант 2)

Такой порядок операций исключает комкование окислителя. Металлические горючие и цементаторы обычно содержат влагу в допустимых пределах и сушке не подвергаются. Кроме того, металлические горючие поставляются заводом-изготовителем в измельченном и разделенном на фракции виде. Поэтому технологический процесс изготовления металлических горючих состоит из одной контрольной операции просеивания.

Технологический процесс подготовки цементаторов, вводимых в состав в виде лаков, сводится к двум операциям: дроблению и приготовлению лака.

Второй этап технологического процесса (рис. 4.6, 4.7) производства пиротехнических составов включает следующие операции: дозировка компонентов, смешение, грануляция, провяливание, сушка, просеивание.

Количество дозировок и необходимость введения других операций определяются числом компонентов, входящих в состав, и видов компонентов. Если цементатор вводится в состав в виде лака, то технологические процессы приготовления составов включают все вышеперечисленные операции. Если же состав готовится сухой, т.е. без цементатора, то в этом случае технологический процесс будет включать операции дозирования, смешения и просеивания.

4.4. Технологические процессы сборки (монтажа пуль и снаряжения патронов)

Технологические процессы монтажа пуль и снаряжения патронов представляют собой совокупность операций по сборке и соединению элементов пуль и патронов, и получению их заданной формы и размеров.

Все операции технологических процессов делятся на три группы: основные, подготовительные и вспомогательного назначения. К основным относятся все штампосборочные операции (запрессовка, загибка (обжим) кромок, конусование (обжим) хвостовой части пуль, накатка, капсюлирование, кернение и др. К подготовительным операциям следует отнести дозировку, насыпку, наборку в кассеты, вставку и т.п. К операциям вспомогательного назначения относятся транспортирование и контроль.

Технологический процесс монтажа пуль делится на два этапа: сборка узлов пуль и монтаж пуль.

В зависимости от назначения в конструкциях пуль предусматривается различное количество узлов. В пулях обыкновенного действия и бронебойных имеется один узел «стальной сердечник–свинцовая рубашка», в пулях типа БЗТ – два узла: сердечник–рубашка, трассер; в пулях типа МДЗ – три узла первой ступени и два узла второй ступени сборки (см. рис. 4.1).

Следует выделить два типа процессов сборки узлов пуль, состоящих как из металлических, так и неметаллических элементов, в частности, пиротехнических составов. Первый тип процесса обычно включает одну или несколько операций (вставка и догонка сердечника или стакана в свинцовую рубашку, запрессовка втулки в пиростакан и т.п.). Второй тип процесса характеризуется включением нескольких дополнительных операций, например, насыпка и запрессовка пиротехнического состава. На рис. 4.8–4.10 приведены схемы технологических процессов монтажа пуль обыкновенного и специального действия.

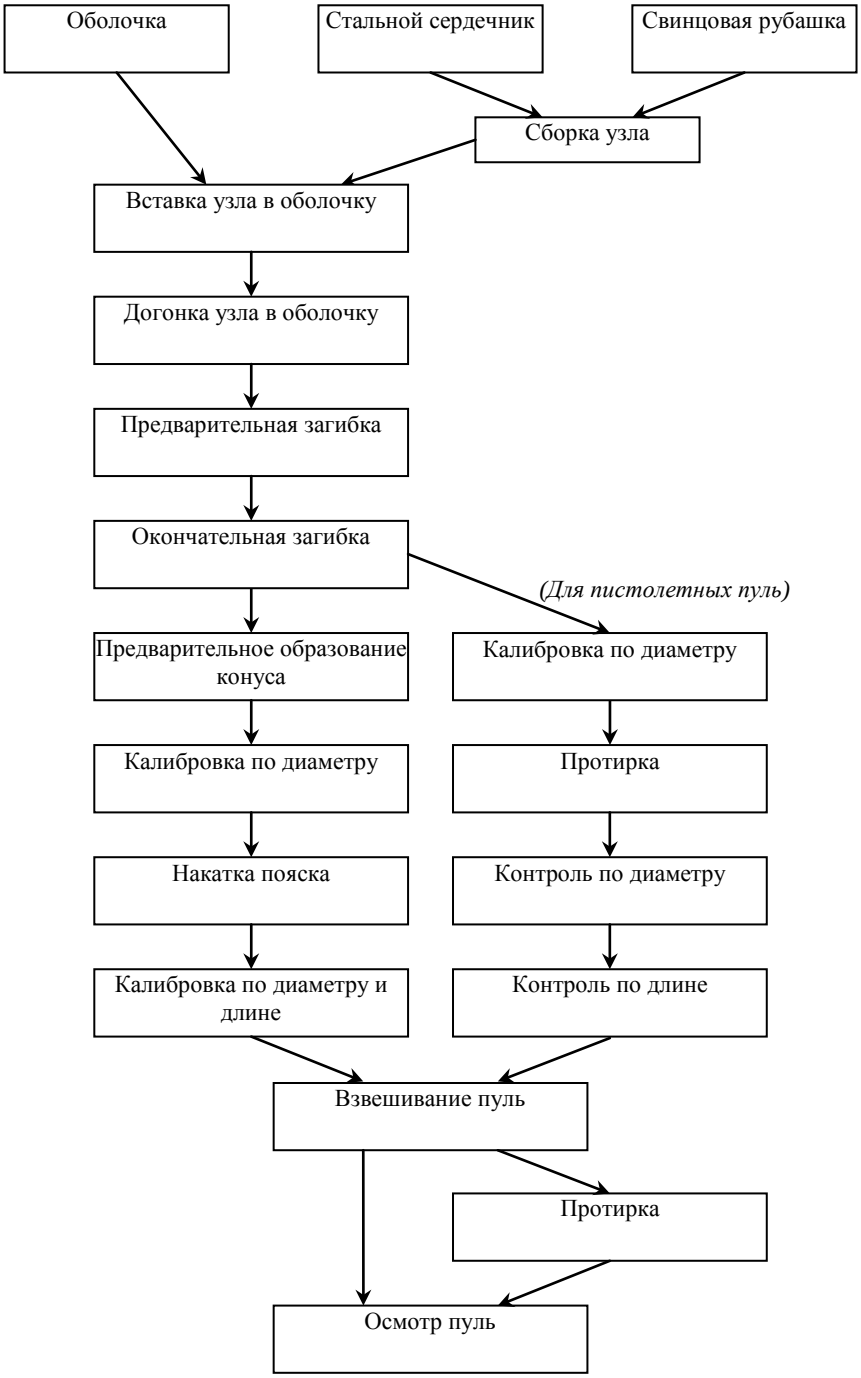


Рис. 4.8. Схема типового технологического процесса монтажа пуль обыкновенного действия

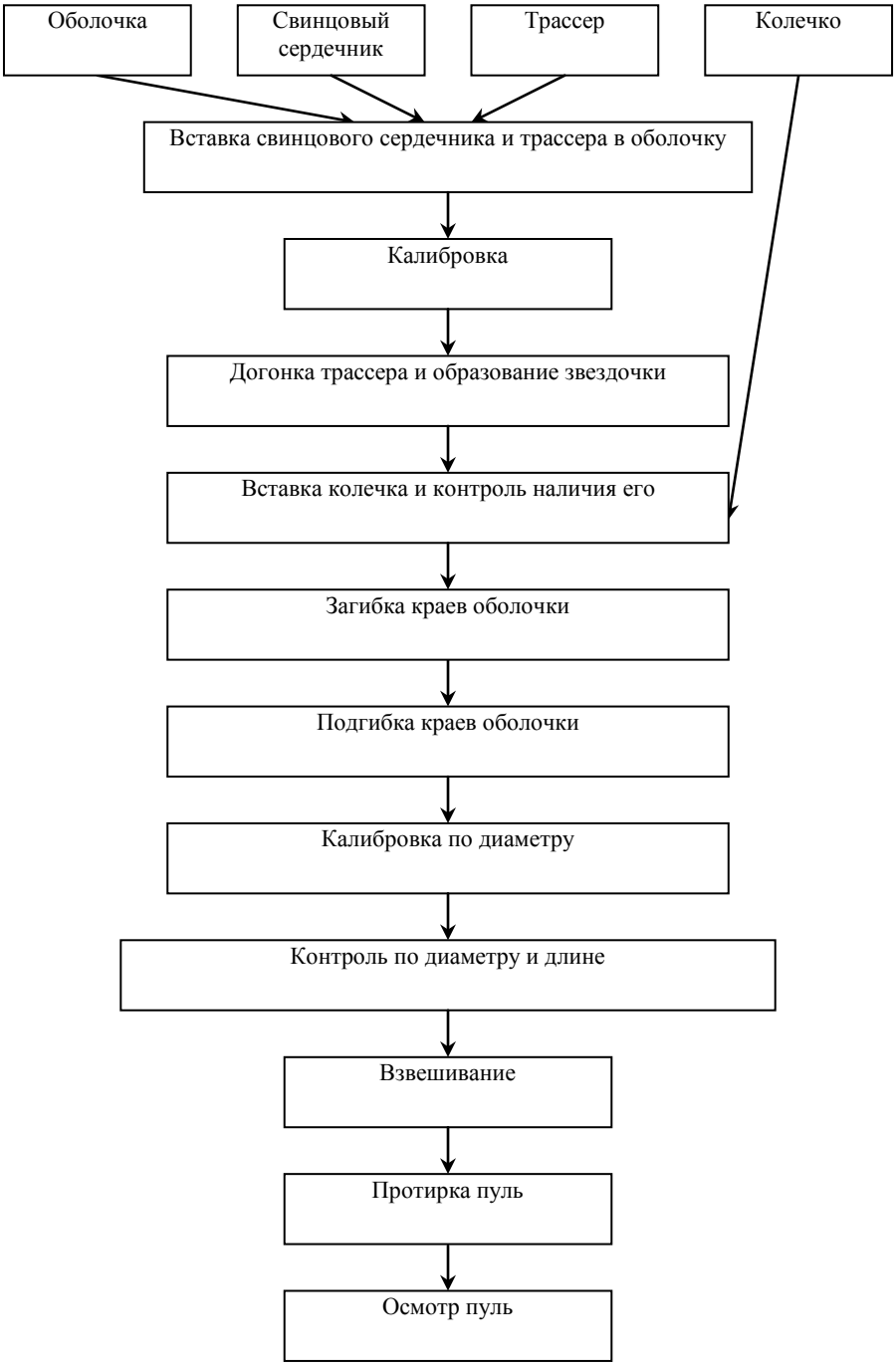


Рис. 4.9. Схема типового технологического процесса монтажа трассирующей пули

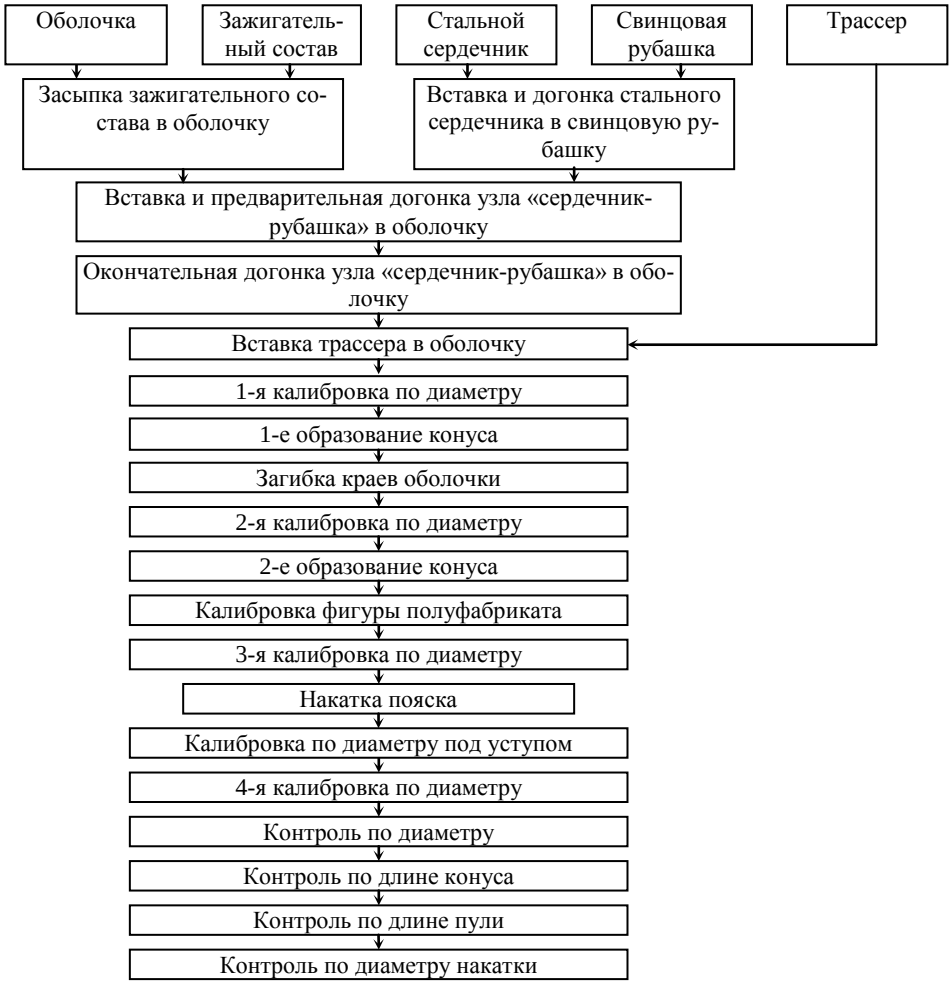


Рис. 4.10. Схема типового технологического процесса монтажа пули специального тройного действия (БЗТ)

Типовой технологический процесс снаряжения патрона (рис. 4.11) можно разделить на три этапа:

1) подготовка к сборке элементов патрона: пороха (выдержка, просеивание, насыпка), капсюлей (осмотр, наборка в кассеты);

2) сборка базовой сборочной единицы гильза-капсюль (капсюлирование, кернение для крупного калибра, осмотр, контроль высоты посадки капсюля, расправка дульца гильзы);

3) снаряжение патрона (дозировка и насыпка пороха, контроль наличия пороха, вставка пули, обжим, каморение 1 и 2, взвешивание, герметизация, контроль по длине, осмотр).

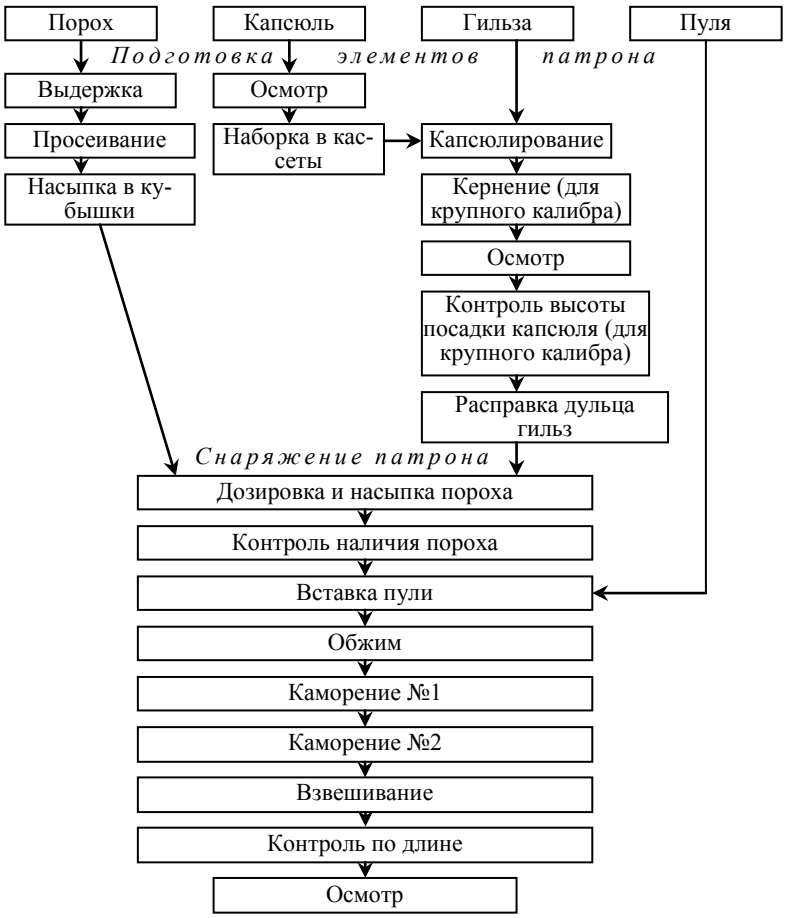


Рис. 4.11. Схема типового технологического процесса снаряжения патрона

Кроме перечисленных обязательных технологических операций в зависимости от назначения патрона могут вводиться и другие, дополнительные операции, например, для патронов специального назначения вводится операция по окраске вершин пуль.

Библиографический список

1. *Агеев Н.П.,* Данилин Г.А., Огородников В.П. Технология производства патронов стрелкового оружия. Ч. 1. Технологические основы проектирования патронов: учебник / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2005. 352 с.

2. *Агеев Н.П.,* Данилин Г.А., Огородников В.П. Технология производства патронов стрелкового оружия. Ч. 2. Процессы штамповки: учебник / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2006. 533 с.

5. КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАТРОНОВ

5.1. Классификация процессов штамповки

Классификация процессов штамповки построена на основе применения принципа технологического подобия группируемых процессов в виде иерархической структуры с использованием понятий части и целого, обобщаемого и обобщающего, правил деления объема понятий и выделенных в качестве классификационных признаков подобия (рис. 5.1).

В каждом из вертикальных рядов схемы понятия размещаются снизу вверх по возрастающей степени обобщенности от разновидности (первый, низший уровень) и вида процесса штамповки до подгруппы, группы, подкласса и класса (конечный, высший уровень деления). Единицей сходимости вертикальных рядов служит понятие «процессы штамповки», обобщающее понятие всех сходящихся рядов. В горизонтальных рядах размещаются понятия одного порядка, объединенные по определенному признаку технологического подобия и классификации.

К основным признакам классификации относятся:

1) вид исходного полуфабриката;

2) отношение свободных $F_{\text{св}}$ и контактирующих $F_{\text{к}}$ с инструментом поверхностей заготовки, ограничивающих пластически деформируемый участок заготовки (очаг пластической деформации), т.е. $F_{\text{св}}/F_{\text{к}}$;

3) схема напряженного состояния заготовки в очаге пластической деформации, определяемая по отношению суммы главных нормальных ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) и контактного ($\sigma_{\text{к}}$) напряжений к интенсивности напряжений σ_i, т.е.

$$K = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/\sigma_i \text{ и } \sigma_{\text{к}}/\sigma_1 ;$$

4) условие ограничения деформации в процессах штамповки, устанавливаемое по отношению требуемой для формообразования детали степени деформации e_i к ее предельному, до разрушения материала заготовки значению $e_{i\text{p}}$, т.е. $e_i/e_{i\text{p}}$;

5) вид технологической (механической) схемы процесса штамповки по направлению действующих в очаге пластической деформации сил и характеру формоизменения деформируемой заготовки.

По первым трем признакам выделены три класса (листовой, объемной, объемно-листовой) и подклассы (тонколистовой, толстолистовой; объемной открытой, полузакрытой, закрытой; шесть подклассов объемно-листовой) процессов штамповки (рис. 5.1). Для процессов листовой штамповки исходными полуфабрикатами служат листы, полосы, ленты, трубы, а также штучные заготовки, получаемые из листового проката.

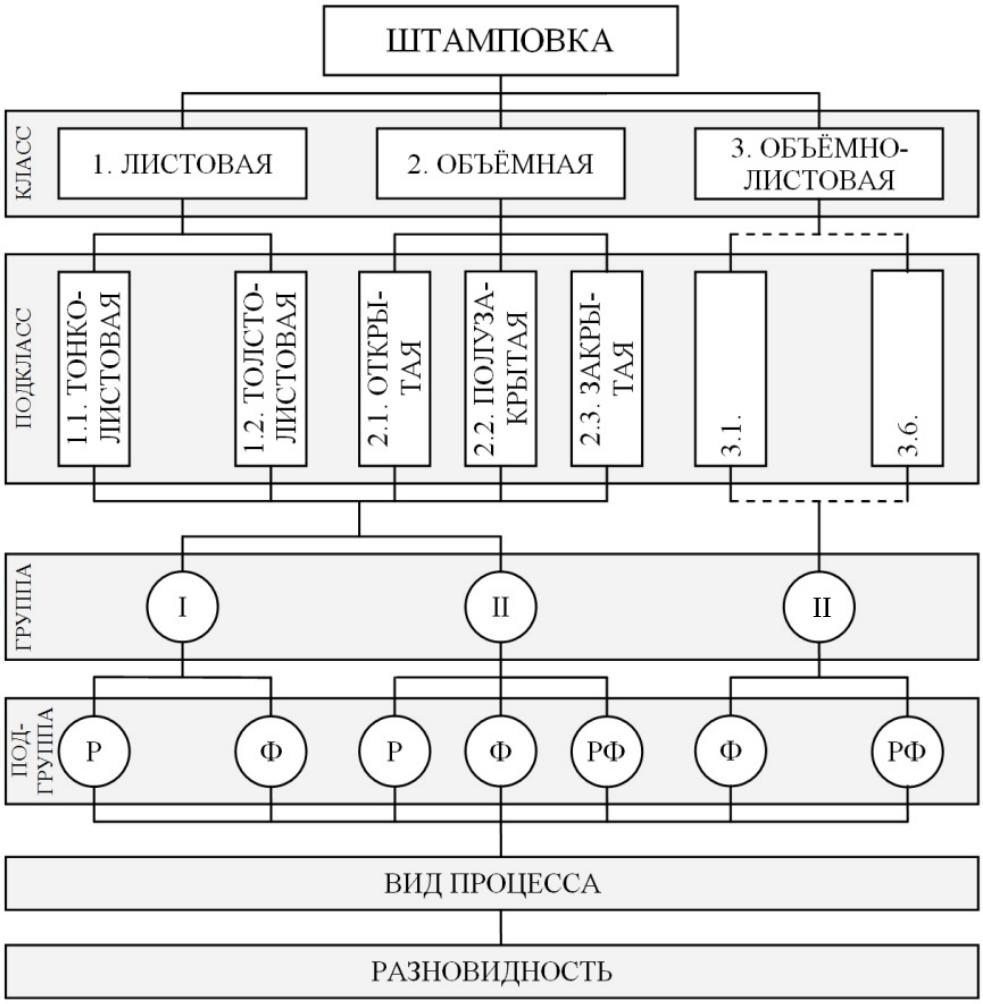


Рис. 5.1. Классификация процессов штамповки: I – простые; II – комбинированные; Р – разделительные; Ф – формоизменяющие; РФ – разделительно-формоизменяющие

В процессах объемной штамповки преимущественно применяется сортовой прокат в виде прутков, однако используются достаточно широко штампованные из листового проката заготовки и толстостенные трубные заготовки.

В процессах тонколистовой штамповки схема напряженного состояния в очаге пластической деформации, как правило, плоская ($-2 < k < +2$), так как главное напряжение, направленное по нормали к срединной (по толщине стенки) поверхности заготовки, либо равно нулю, либо намного меньше по модулю интенсивности напряженного состояния ($-0{,}1 \le \sigma_к / \sigma_i \le 0$).

Процессы объемной штамповки отличаются объемной схемой напряженного состояния и действием, в основном, сжимающих напряжений в зоне очага пластической деформации ($k << 0$). Процессы толстолистовой штамповки относятся к подклассу переходных от листовой к объемной. Они характеризуются объемной схемой напряженного состояния, но при действии напряжений разного знака, растягивающих (положительных) и сжимающих (отрицательных).

Принимаем для выделенных подклассов следующие граничные значения относительного нормального контактного напряжения $\sigma_к / \sigma_i$: тонколистовая – до 0,1; толстолистовая – до 1,0; открытая объемная – до 1,5; полузакрытая объемная – до 3,0; закрытая объемная – более 3,0.

Выделенные шесть подклассов процессов объемно-листовой штамповки могут быть созданы в качестве комбинированных процессов на основе сочетания условно простых процессов, относящихся к подклассу листовой и объемной штамповки. Следующий, на ступень ниже, уровень классификации предусматривает выделение в каждом подклассе условно простых (группа I) и комбинированных (группа II) процессов. При этом формирование простых процессов базируется на выявлении основных технологических схем деформации, а комбинированных – на объединении разнородных простых процессов, выполняемых одновременно или последовательно в комбинированных штампах совмещенного или последовательного действия.

С учетом условия ограничения деформации в каждой из выделенных классификационных групп (I и II) различают подгруппы разделительных (Р), формоизменяющих (Ф) и разделительно-формоизменяющих (РФ) процессов штамповки.

В процессах разделительной штамповки формообразование детали осуществляется за счет разрушения материала заготовки по заданному контуру штампуемой детали при выполнении условия

$$e_i / e_{i\text{р}} = 1.$$

В процессе формоизменяющей штамповки разрушение заготовки недопустимо, поэтому должно выполняться условие прочности

$$e_i / e_{i\text{р}} \le e_{i\text{доп}} / e_{i\text{р}} < 1,$$

где $e_{i\text{доп}}$ – допустимая степень деформации, исключающая с определенной вероятностью разрушение материала заготовки.

Примерами простых процессов разделительной штамповки служит вырубка, тонколистовой формоизменяющей штамповки – вытяжка без утонения, формоизменяющей объемной штамповки – выдавливание. Нижний уровень классификации определяет виды процессов штамповки, устанавливаемых по виду технологических (механических) схем.

Количество условно простых технологических схем и видов процессов штамповки ограничено и регламентировано по наименованию в справочной литературе и в стандартах. Виды комбинированных процессов и их количество строго не регламентированы. Создание новых комбинированных процессов штамповки на базе прогрессивного технологического оснащения способствует дальнейшему развитию технологии штамповочного производства в различных отраслях промышленности.

5.2. Характеристика и область применения процессов листовой разделительной штамповки

К подгруппе процессов листовой разделительной штамповки относятся отрезка, надрезка, вырубка, пробивка, обрезка, зачистка.

Отрезка – процесс полного отделения части заготовки в виде полосы, ленты или единичной заготовки по незамкнутому контуру путем сдвига (рис. 5.2).

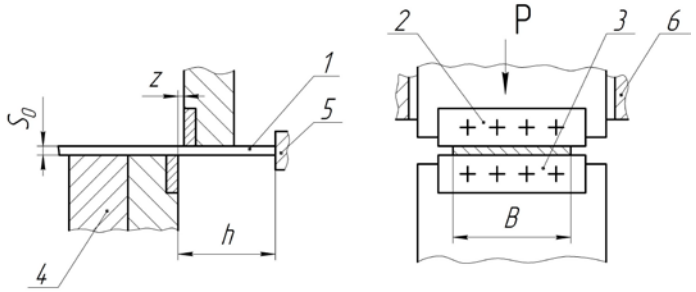


Рис. 5.2. Технологическая схема отрезки ножами с параллельными режущими кромками: *1* – исходная листовая заготовка; *2,3* – верхний и нижний ножи; *4* – стол; *5* – упор; *6* – направляющие ползуна пресс-ножниц

На представленной технологической схеме полоса *1* толщиной S_0 подается до настраиваемого на определенный размер отрезаемой заготовки упора *5*, и при перемещении верхнего ножа *2*, закрепленного на ползуне пресс-ножниц, относительно нижнего неподвижного ножа *3* происходит его внедрение до разрушения материала и отделение заготовки (детали). При отрезке ножами с параллельными режущими кромками отделение одной части заготовки от другой происходит одновременно по всему ее поперечному сечению, что требует больших технологических усилий. Поэтому этот способ в основном применяют для резки тонколистового материала. В отличие от этого способа отрезка ножами с наклонным расположением режущих кромок (гильотинные ножницы) характеризуется неодновременным по сечению листа (полосы) отделением одной части заготовки от другой и во много раз меньшими технологическими усилиями. По типу применяемого технологического оборудова-

ния с поступательным движением рабочего инструмента и наклонным расположением ножей известны способы отрезки на гильотинных, рычажных и вибрационных ножницах. Применяют также способы отрезки вращающимися круглыми ножами на однодисковых, парнодисковых и многодисковых ножницах (рис. 5.3).

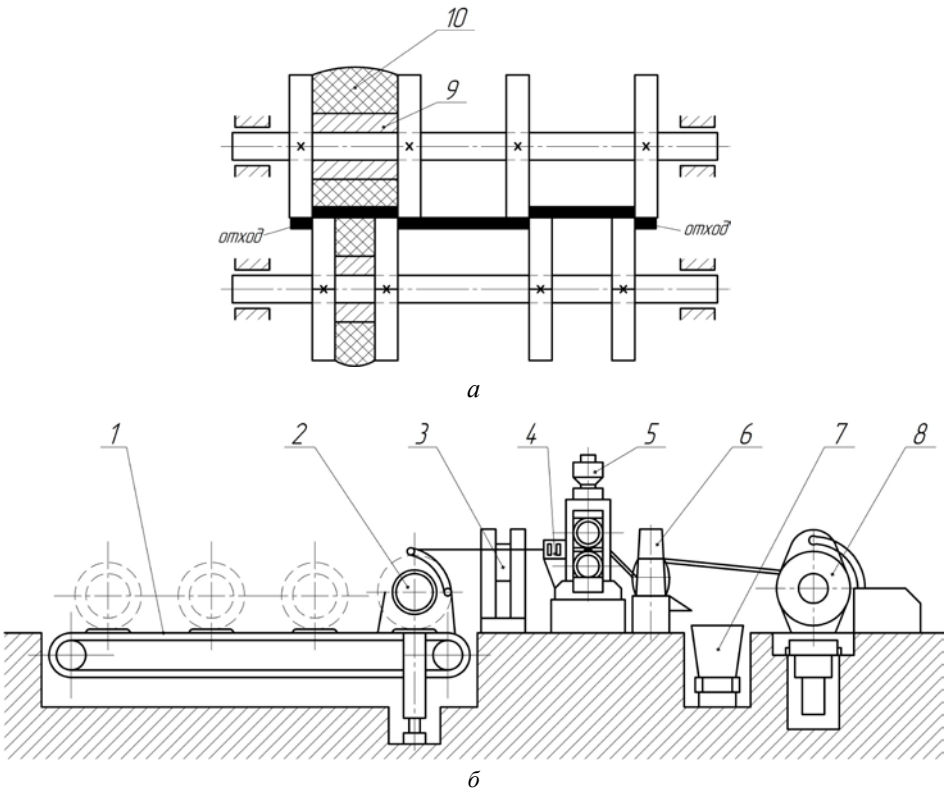


Рис. 5.3. Технологические схемы отрезки на многодисковых ножницах с прижимом (*а*) и автоматической линий для продольной резки (*б*): *1* – цепной конвейер; *2* – разматывающее устройство; *3* – правильно-подающее устройство; *4* – правильный механизм; *5* – дисковые ножницы; *6* – кромкокрошитель; *7* – бункер; *8* – наматывающее устройство; *9* – распорное кольцо; *10* – эластичный прижим

Многодисковые ножницы благодаря двустороннему резу и надежному прижиму резиновыми кольцами в процессе резки, обеспечивают в сравнении с другими способами, более высокую точность по ширине отрезаемых полос и лент при высокой производительности.

Надрезка – процесс неполного отделения части заготовки по незамкнутому контуру путем сдвига, не сопровождающийся образованием и удалением отхода. В патронном производстве практически не применяется.

Вырубка – процесс полного отделения части заготовки по замкнутому контуру путем сдвига с удалением через отверстие матрицы детали (рис. 5.4). Широко применяется в патронном производстве для получения плоских заготовок из полос и лент.

На представленной схеме отштампованная деталь *3* удаляется через отверстие матрицы *2* «на провал», а остаток заготовки (полосы, ленты) – отход *5* – снимается при обратном ходе с пуансона *1* съемником *4*.

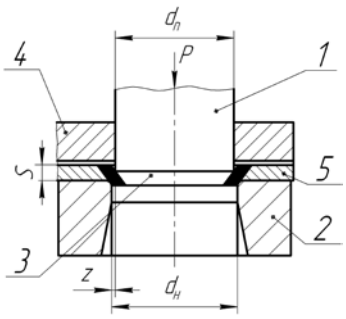


Рис. 5.4. Технологическая схема процесса вырубки: *1* – пуансон; *2* – матрица; *3* – деталь; *4* – съемник; *5* – заготовка

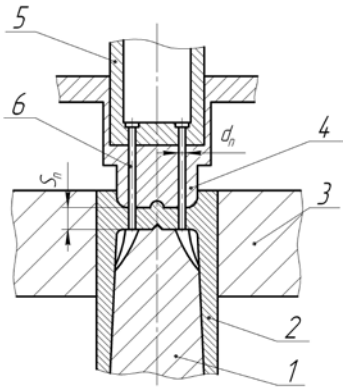


Рис. 5.5. Технологическая схема пробивки запальных отверстий в гильзе: *1* – матрица-стойка; *2* – полуфабрикат; *3* – матрица; *4* – большая игольная камера; *5* – малая игольная камера; *6* – пуансон

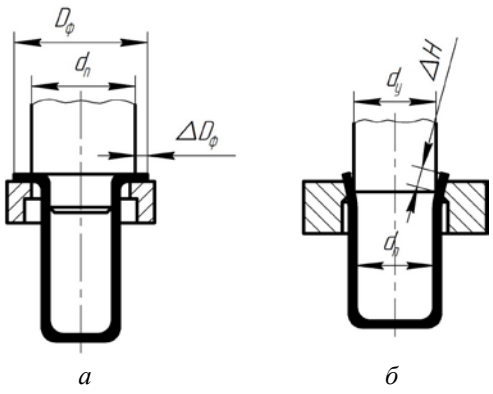
Пробивка по определению и технологической схеме близка к вырубке (рис. 5.5), но состоит в образовании в детали отверстия или паза путем сдвига с удалением части заготовки в виде отхода через отверстие в матрице. Пробивка в основном применяется в патронном производстве для получения запальных (затравочных) отверстий в дне гильз и в некоторых других элементах патронов (втулках, оболочках, пиростаканах и т.п.).

Особенностью процесса пробивки запальных отверстий в полых деталях типа гильз являются малые относительные диаметры пробиваемых отверстий ($d/S_п \le 1{,}0$, где d – диаметр запального отверстия; $S_п$ – толщина пробиваемой перегородки) и применение матриц с незамкнутым контуром режущих кромок.

Обрезка – процесс полного отделения по замкнутому контуру краевой части заготовки после формоизменяющей операции, например вытяжки, в виде предусмотренных припусков путем сдвига. Обрезку плоского фланца для деталей любых размеров и при любом типе производства выполняют ступенчатым пуансоном, состоящим из рабочей ступени и ловителя (рис. 5.6,*а*). Диаметр ловителя на 0,2…0,3 мм меньше внутреннего диаметра

обрезаемой заготовки. Диаметр рабочей ступени пуансона $d_{п}$ равен разности диаметра фланца детали после вытяжки D и удвоенного припуска на обрезку фланца $\Delta D_{о}$, т.е.

$$d_{п} = D_{о} - 2\Delta D_{о}.$$



а *б*

Рис. 5.6. Технологические схемы обрезки в штампе плоского фланца (*а*) и краевой части вытягиваемой (без фланца) детали (*б*)

При обрезке по схеме, представленной на рис. 5.6,*б*, реализуется процесс комбинированной совмещенной разделительно-формоизменяющей штамповки «вытяжка–обрезка». В этом случае диаметр матрицы равен наружному диаметру вытянутой детали, а пуансон вытяжки имеет уступ, диаметр которого несколько больше диаметра рабочей части, обеспечивающей вытяжку, но меньше исполнительного размера матрицы, ее цилиндрического пояска:

$$d_{у} = d_{м} - (0{,}03 \div 0{,}05)\ \text{мм}.$$

При перемещении пуансона происходит вытяжка заготовки, а в конце рабочего хода – обрезка (откуска) ее неровного, некачественного края, после чего пуансон проталкивает отштампованную заготовку (деталь) через матрицу, а отход в виде колечка сбрасывается с пуансона и удаляется из штампа. Обрезка, совмещенная с вытяжкой, не обеспечивает высокого качества поверхности среза заготовки и поэтому в основном применяется на промежуточных операциях технологического процесса. Для обрезки полых заготовок и деталей также применяют способы обрезки дисковыми ножами и отрезными резцами (рис. 5.7). При обрезке полых заготовок по схеме, представленной на рис. 5.7,*а*, обрезаемое изделие устанавливается на опорные ролики с прижимом донной части до упора.

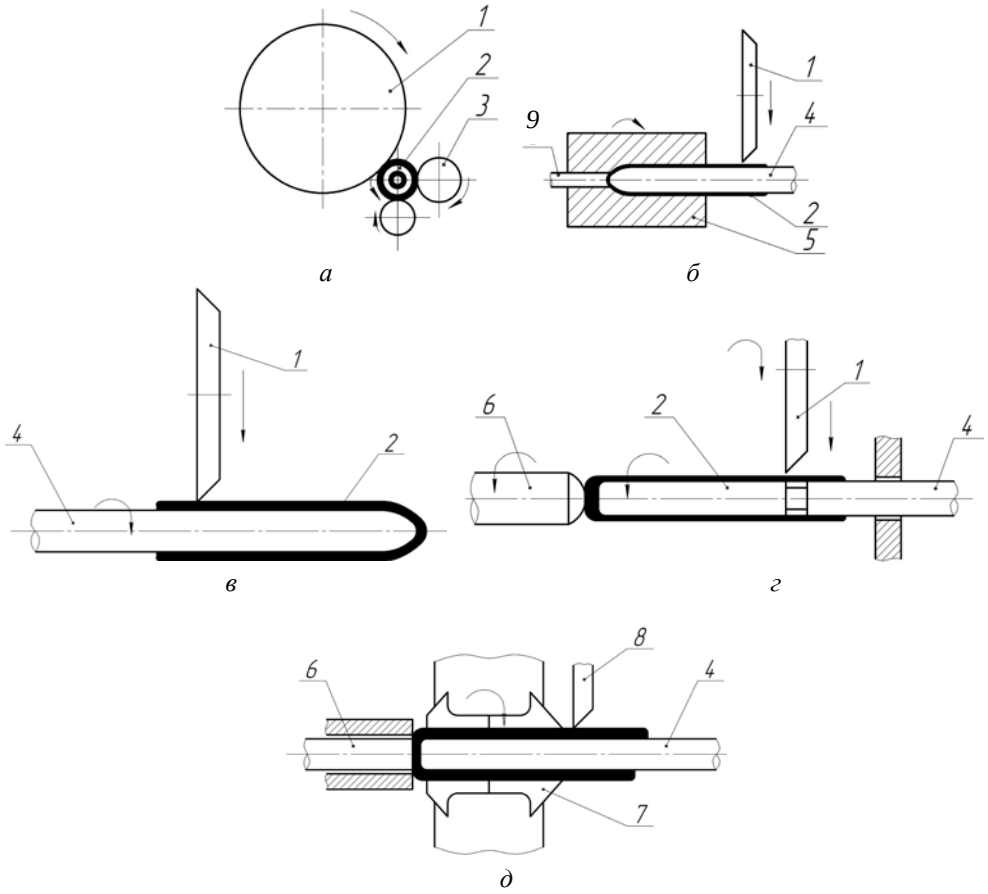


Рис. 5.7. Технологические схемы обрезки полых заготовок дисковыми ножами (*а*, *б*, *в*, *г*) и отрезным резцом (*д*): *1* – дисковый нож; *2* – заготовка; *3* – опорный ролик; *4* – оправка; *5* – матрица; *6* – прижим; *7* – цанга; *8* – резец; *9* – выталкиватель

Принудительно вращающийся дисковый нож приводит во вращение заготовку и при его поперечной подаче отделяет отход в виде кольца, соответствующего по размерам припускам на обрезку.

При обрезке по схеме рис. 5.7,*б* обрезаемая заготовка заталкивается вращающимся стержнем-оправкой во вращающуюся с той же угловой скоростью матрицу и фиксируется.

Обрезка выполняется дисковым ножом, которому сообщается от заготовки вращение при его поперечной подаче. Технологическая схема рис. 5.7,*в* есть разновидность предыдущей схемы и применяется для обрезки свинцовых рубашек.

При обрезке по схеме на рис. 5.7,*г* обрезаемая заготовка надевается на вращающуюся оправку, имеющую на торце насечку. Вращающийся упор *6* прижимает заготовку к торцу оправки и вращает заготовку вместе с оправкой. Дисковый нож, имеющий принудительное вращение или вращение от обрезаемой заготовки, обрезает кромку заготовку при его поперечной подаче.

Технологическая схема на рис. 5.7,*д* предусматривает применение метода обработки резанием. В качестве инструмента применяют обрезные дисковые ножи или призматические резцы. Обрезка выполняется на АРЛ и горизонтальных обрезных станках. На рис. 5.8 представлена схема инструментального блока обрезки пульной оболочки.

Зачистка – процесс отделения припуска со снятием стружки на боковой поверхности вырубленной заготовки при ее продавливании через отверстие зачистной матрицы или пробитого при внедрении пуансона зачистки.

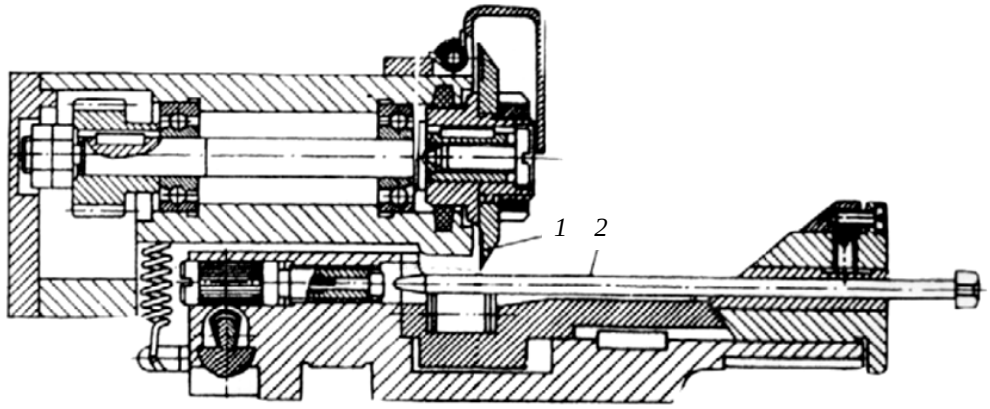


Рис. 5.8. Схема инструментального блока АРЛ для обрезки пульной оболочки:
1 – нож; *2* – оправка

5.3. Характеристика и область применения процессов листовой формоизменяющей штамповки

К группе основных простых процессов листовой формоизменяющей штамповки относятся вытяжка, обжим, раздача, отбортовка, рельефная формовка, калибровка, правка, закатка, гибка, обтяжка. Процессы гибки, обтяжки, закатки в патронном производстве не применяются. Согласно классификации выделены два основных простых процесса вытяжки: без утонения и с утонением стенки.

Вытяжка без утонения стенки – процесс формообразования полой детали из листовой плоской или предварительно отштампованной полой заготовки путем уменьшения ее поперечных размеров и увеличения высоты при

протягивании через матрицу, но без принудительного ее утонения (рис. 5.9,*а*,*б*). Очаг пластической деформации на основной стадии процесса при оптимальных условиях вытяжки находится в краевой части заготовки. Односторонний зазор между пуансоном и матрицей z назначается больше толщины заготовки S, поступающей на вытяжку, т.е. $z/S > 1{,}0$.

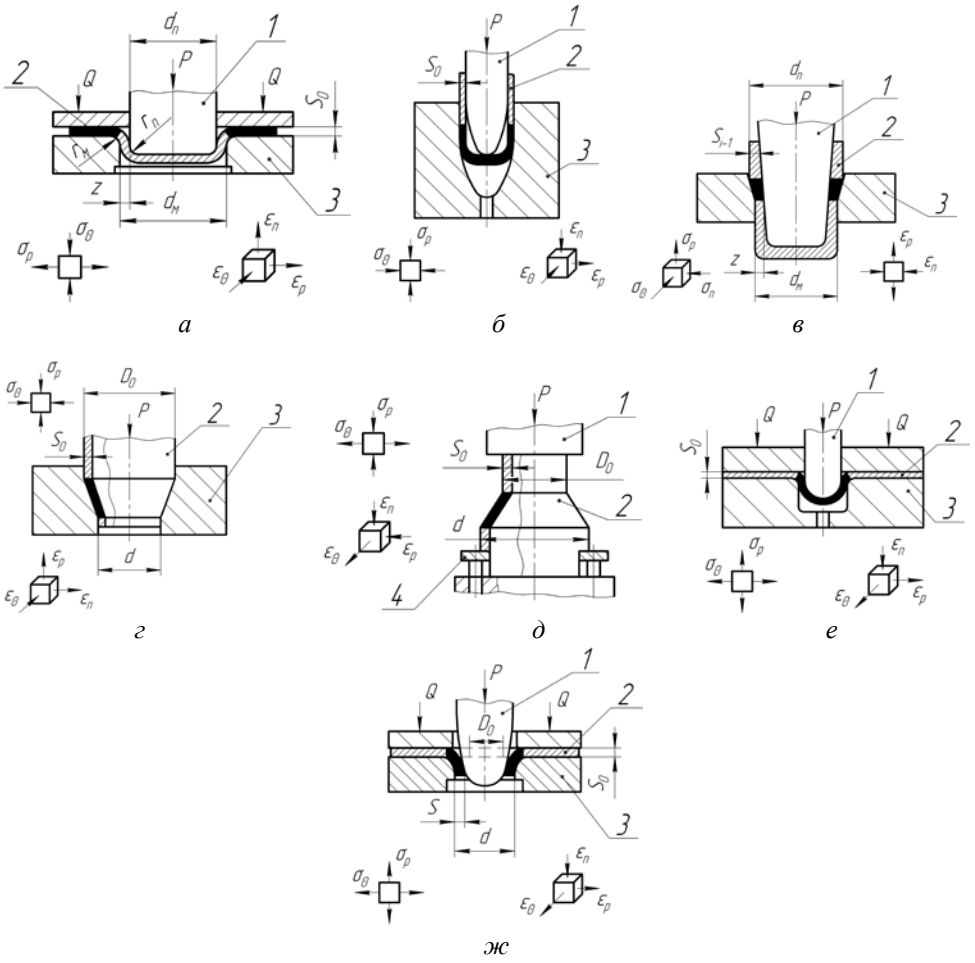


Рис. 5.9. Технологические схемы процессов листовой формоизменяющей штамповки: *а* – первая вытяжка без утонения стенки заготовки с прижимом; *б* – последующая вытяжка без утонения стенки заготовки в «глухой» матрице; *в* – вытяжка с утонением стенки заготовки; *г* – продольный обжим; *д* – раздача; *е* – рельефная формовка; *ж* – отбортовка

Это обусловливает исключение принудительного утонения инструментом стенки заготовки и преобладания в зоне очага пластической деформации свободных поверхностей заготовки ($F_{\text{св}}/F_{\text{к}} > 1{,}0$), а следовательно, схема на-

пряженного состояния соответствует плоской схеме с растягивающими меридиональными $\sigma_{\text{р}}$ и сжимающими тангенциальными σ_θ напряжениями. Показатель, характеризующий жесткость схемы напряженного состояния k на большей части очага пластической деформации, за исключением кромки, имеет положительные значения ($0 < k < 0{,}2$). Нормальное контактное напряжение σ_n на порядок меньше интенсивности напряжений σ_i и предела текучести материала ($\sigma_n / \sigma_i \le 0{,}10$).

Вытяжка с утонением стенки – процесс формообразования полой детали из исходной полой заготовки путем принудительного утонения ее стенки инструментом и увеличения высоты без изменения ее внутреннего диаметра (рис. 5.9,*в*). Односторонний зазор между пуансоном и матрицей z_i назначается меньше толщины стенки заготовки S_{i-1}, поступающей на вытяжку ($z_i / S_{i-1} < 1{,}0$). Очаг пластической деформации на стационарной стадии процесса охватывает часть заготовки, которая находится между пуансоном и матрицей и одновременно контактирует с поверхностями пуансона и матрицы. Для этого процесса удовлетворяются следующие приближенные соотношения определяющих параметров напряженно-деформированного состояния:

$$2 < F_{\tilde{n}\hat{a}} / F_{\hat{e}} < 3;\ -0{,}5 < k < 0{,}9;$$

$$0{,}1 < \sigma_{\text{к}} / \sigma_i < 1{,}0;\ \nu_\varepsilon = 0.$$

В силу приведенных соотношений этот процесс относится к подклассу толстолистовой формоизменяющей штамповки.

Обжим – процесс формообразования полой детали с заданной формой образующей из исходной полой заготовки путем уменьшения ее поперечных размеров и утолщения стенки при заталкивании в сужающуюся полость матрицы (рис. 5.9,*г*). Размеры очага пластической деформации соответствуют размерам сужающейся полости, с которой контактирует заготовка. В зоне очага деформации действуют только сжимающие напряжения ($\sigma_{\text{р}} < 0$, $\sigma_\theta < 0$), тогда как напряжение σ_n, направленное по нормали к свободной поверхности, будет равно нулю ($\sigma_n = 0$). Другие параметры изменяются в следующих пределах:

$$0 \le k \le -1;\quad 0 < \nu_\varepsilon < 1{,}0.$$

Раздача – процесс формообразования полой детали с определенной формой образующей из полой заготовки путем увеличения ее поперечных размеров и утонения стенки при внедрении пуансона с постепенно увеличивающимися размерами поперечного сечения. Очаг деформации контактирует только с рабочей поверхностью пуансона. Схема напряженного состояния заготовки близка к плоской, разноименной, с меридиональными сжимающи-

ми ($\sigma_p < 0$) и тангенциальными растягивающими ($\sigma_\theta > 0$) напряжениями. Наружная поверхность заготовки свободная, поэтому напряжения, направленные по нормали к поверхности, будут равны нулю ($\sigma_n = 0$) (рис. 5.9,*д*).

Рельефная формовка – процесс образования в детали местных выпуклостей за счет утонения стенки в зоне очага деформации без изменения ее наружных размеров. Очаг деформации обычно захватывает часть заготовки, расположенную напротив отверстия в матрице, а схема напряженного состояния близка к плоской одноименной – двустороннему растяжению ($\sigma_p > 0$; $\sigma_\theta > 0$; $\sigma_n = 0$; $k \le 2{,}0$). Деформированное состояние соответствует простому сжатию $(\nu_\varepsilon = 1)$ (рис. 5.9,*е*). Этот процесс находит ограниченное применение в патронном производстве, например, для формообразования продольных канавок в гильзах для учебных патронов и для некоторых других деталей.

Отбортовка (внутренняя) – процесс образования горловин по внутреннему контуру предварительно пробитого в детали отверстия путем внедрения в него пуансона и увеличения диаметра отверстия без изменения наружных размеров детали. Очаг деформации охватывает часть заготовки, находящуюся напротив отверстия в матрице, а схема напряженного состояния близка к плоской одноименной схеме двустороннего растяжения ($\sigma_p > 0$; $\sigma_\theta > 0$; $\sigma_n = 0$; $k < 2{,}0$) (рис. 5.9,*ж*). Разновидностью этого процесса является отбортовка наружная. Может применяться для образования закругленных бортов на краях полых заготовок.

5.4. Характеристика и область применения процессов объемной штамповки

По аналогии с процессами листовой штамповки в процессах объемной штамповки можно выделить подгруппы процессов объемной разделительной и формоизменяющей штамповки.

5.4.1. Процессы разделительной штамповки

По виду исходного материала к процессам этой подгруппы можно отнести процессы отрезки в штампах из прутка и проволоки цилиндрических заготовок для гильз, сердечников, рубашек, а также процессы чистовой вырубки листовых заготовок и пробивки отверстий.

Отрезка – процесс отделения части прутка по незамкнутому контуру путем сдвига в штампах. Широко распространен процесс резки сдвигом прутков во втулочных штампах. Наилучшее качество поверхности среза обеспечивается при применении способа отрезки с дифференцированным прижимом заготовки (рис. 5.10).

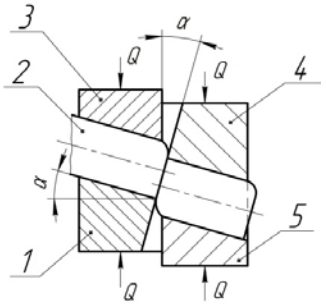


Рис. 5.10. Технологическая схема процесса отрезки сдвигом с дифференцированным зажимом прутка: *1,4* – ножи; *2* – пруток; *3,5* – прижимы

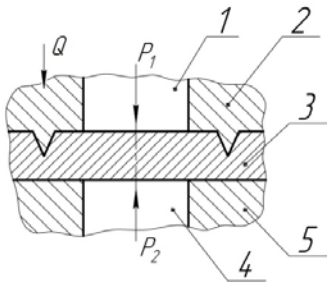


Рис. 5.11. Технологическая схема процесса чистовой вырубки: *1* – пуансон; *2* – прижим; *3* – заготовка; *4* – выталкиватель; *5* – матрица

Вырубка (пробивка) чистовая – процесс отделения части заготовки по замкнутому контуру в виде детали при вырубке или отхода при пробивке в условиях всестороннего неравномерного сжатия в зоне очага пластической деформации (рис. 5.11) при $P_2 < P_1$.

Схема всестороннего неравномерного сжатия ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3 < 0$) создается за счет внедрения в заготовку прижима с клиновидным ребром, идущим вдоль наружного контура детали. При такой схеме напряженного состояния в очаге деформации заготовка пластически деформируется без разрушения при внедрении пуансона почти на полную ее толщину и обеспечивается шероховатость поверхности среза R_z = 3,2 ÷1,6 мкм и точность размеров по 6–9-му квалитетам.

5.4.2. Процессы формоизменяющей штамповки

К основным процессам объемной формоизменяющей штамповки, применяемым в холодноштамповочном и в том числе патронном производстве, относятся осадка, высадка, выдавливание, редуцирование, чеканка, клеймение, кернение.

Осадка – процесс формообразования сплошных заготовок пространственной формы или их частей путем уменьшения высоты и увеличения площади поперечного сечения. Очаг пластической деформации охватывает весь объем заготовки или деформируемой ее части (рис. 5.12). В зоне очага пластической деформации схема напряженного состояния соответствует всестороннему неравномерному сжатию ($\sigma_1 < 0$, $\sigma_2 < 0$, $\sigma_3 < 0$; $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$; $k << 0$). По соотношению свободных $F_{св}$ и контактных $F_к$ поверхностей и относительной величине нормального контактного нормального напряжения $\sigma_n/\sigma_i < 1{,}5$ этот процесс относится к подклассу открытой объемной штамповки.

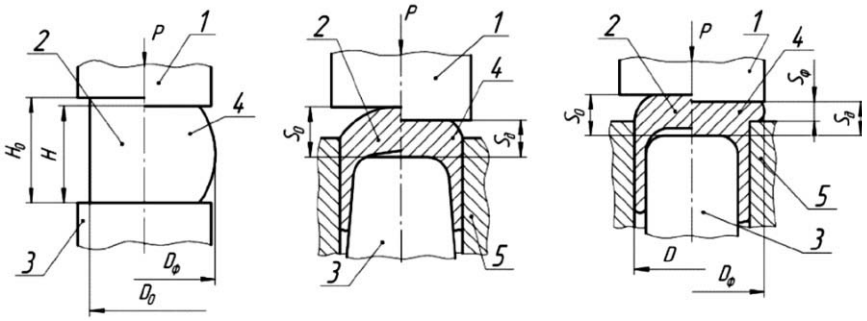


Рис. 5.12. Технологические схемы процессов осадки сплошных (*а*), осадки (*б*) и высадки (*в*) высоких полых с дном заготовок, *1* – пуансон; *2* – исходная заготовка; *3* – опорный пуансон; *4* – деталь; *5* – матрица

Высадка – процесс, аналогичный осадке, но очаг пластической деформации распространяется не на весь объем исходной заготовки, а на ее часть (рис. 5.13).

Выдавливание – процесс формообразования полой или сплошной детали путем вытеснения металла исходной заготовки в полость и (или) зазоры, образованные рабочим инструментом (рис. 5.14). При выдавливании исходная заготовка полностью размещается в матрице; тем самым до минимума ограничиваются ее свободные поверхности $F_{св}$. По соотношению свободных и контактных поверхностей заготовки $F_{св}/F_к$ и схеме напряженного состояния выдавливание относится к подклассу процессов полузакрытой объемной штамповки. В патронном производстве оно применяется для получения полых заготовок гильз из прутка, стальных и свинцовых сердечников, рубашек из свинца и алюминия.

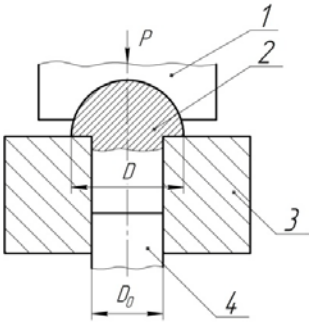


Рис. 5.13. Технологическая схема процесса высадки сплошной заготовки *1* – пуансон; *2* – заготовка; *3* – матрица; *4* – выталкиватель

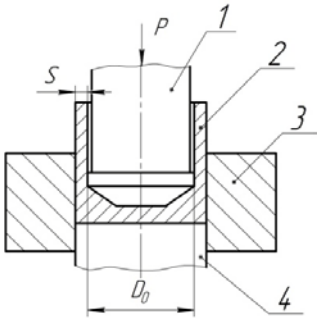
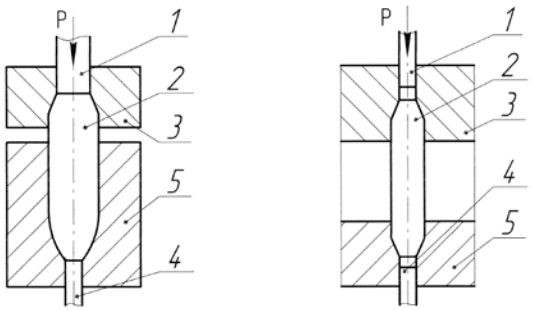


Рис. 5.14. Технологическая схема процесса продольного обратного выдавливания: *1* – пуансон; *2* – заготовка; *3* – матрица; *4* – выталкиватель

Редуцирование – процесс формообразования полых или стержневых деталей путем уменьшения площади поперечного сечения заготовки при проталкивании ее через калибрующую матрицу усилием, направленным по оси заготовки (рис. 5.15).

В отличие от выдавливания при редуцировании часть исходной заготовки находится вне контакта с рабочим инструментом, что увеличивает ее свободную поверхность и отношение $F_{св}/F_{к}$ и существенно ограничивает, при той же схеме напряженного состояния, предельные и допустимые степени деформации ввиду возможной потери устойчивости пластического деформирования внеконтактного участка заготовки. В патронном производстве процесс применяется при изготовлении стальных сердечников пуль.



а *б*

Рис. 5.15. Технологические схемы процесса редуцирования, применяемые при изготовлении сердечников: *1* – пуансон; *2* – заготовка *3,5* – матрицы; *4* – выталкиватель

Чеканка – процесс образования на поверхности детали неглубокого одностороннего или двустороннего рельефа путем местного выдавливания.

Близкими к этому процессу являются клеймение и кернение, применяемые в патронном производстве для нанесения знаков на наружные поверхности дна гильз и точечных углублений на деталях при сборке патронов.

5.5. Характеристика и область применения процессов комбинированной штамповки

Большие резервы по интенсификации производства заложены в применении процессов комбинированной штамповки. В соответствии с принятой классификацией (п. 5.1) выделены процессы листовой, объемной и объемно-листовой комбинированной штамповки.

5.5.1. Комбинированная листовая штамповка

Листовая комбинированная штамповка делится на разделительную, формоизменяющую и разделительно-формоизменяющую. По способу выполнения объединяемых операций во времени различают последовательную, совмещенную и совмещенно-последовательную штамповку, выполняемые в соответствующих по названию комбинированных штампах и инструментальных блоках.

Комбинированная последовательная штамповка объединяет несколько разнородных операций, выполняемых последовательно на различных позициях комбинированного штампа или пресса, при транспортировке листовой заготовки (полосы, ленты) за каждый ход ползуна пресса с одной позиции штампа на другую. Готовая деталь получается на последней позиции штампа вырубкой или отрезкой. Деформация заготовок на каждой из объединяемых операций, при условии выбора оптимальных расстояний между соседними позициями штампа $A_{опт} > 1/2 \cdot (l_{опд})_i + 1/2 \cdot (l_{опд})_{i+1}$, осуществляется независимо, что полностью исключает взаимодействие деформационных и силовых полей на соседних участках заготовки, где $A_{опт}$ – оптимальное расстояние между осями двух соседних позиций штампа и заготовки, $(l_{опд})_i$, $(l_{опд})_{i+1}$ – размеры очага пластической деформации (ОПД) на двух соседних i и $i+1$ позициях.

Технико-экономический эффект комбинированного процесса в этом случае достигается за счет исключения транспортировки заготовок между прессами, сокращения количества штампов, технологического оборудования и рабочих.

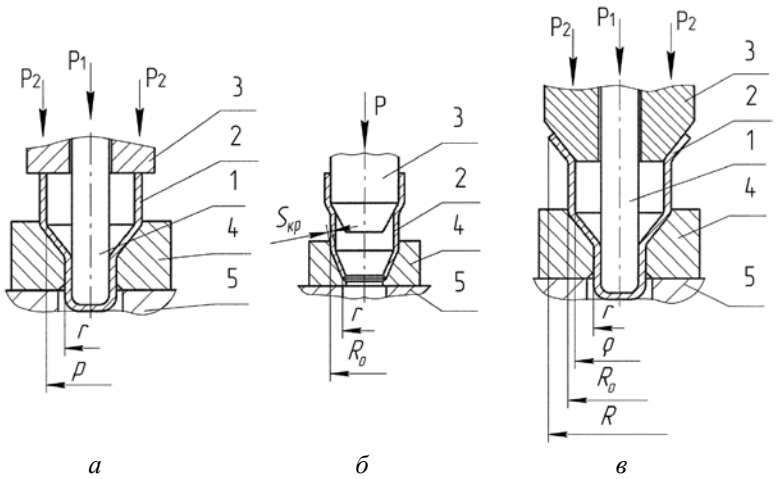
При уменьшении расстояния между позициями штампа в сравнении с его оптимальным значением ($A < A_{опт}$) возможно взаимодействие соседних полей деформации и напряжений и, как следствие, нарушение условий жесткости и прочности транспортируемой заготовки (полосы, ленты) и качества штампуемой детали.

Комбинированная последовательная штамповка применяется преимущественно для объединения разделительных (пробивки, надрезки, обрезки, зачистки, вырубки, отрезки), а также разделительных и нескольких формоизменяющих (вырубки, вытяжки, рельефной формовки, обрезки, отбортовки, пробивки) процессов штамповки. Штампы для рассматриваемой схемы допускают применение высокоскоростных прессов с числом двойных ходов до 500 и более в минуту. Преимуществом комбинированной последовательной штамповки следует считать возможность выполнения в одном штампе и на одном прессе большого числа разнородных процессов штамповки без переналадки штампов для получения небольших деталей сложной формы при толщине ленты (полосы) более 0,2 мм и значительное повышение производительности, в особенности при многорядной штамповке в ленте.

Комбинированная совмещенная штамповка объединяет несколько простых разнородных процессов штамповки, выполняемых за один ход ползуна на одной позиции комбинированного совмещенного штампа (инструментально – блока АРЛ). При этом число объединяемых простых процессов штамповки, как правило, не превышает 4 – 5, так как при большем числе повышается степень сложности оснастки.

Примерами процессов штамповки этого вида могут служить:

- вырубка–пробивка, надрезка–вырубка (разделительные процессы);
- вырубка–вытяжка без утонения, вырубка–свертка, вытяжка–обрезка (разделительно-формоизменяющие процессы);
- вырубка–вытяжка без утонения – вытяжка с утонением (комбинированная вытяжка);
- вытяжка без утонения–обжим, обжим–раздача, вытяжка–обжим–раздача (формоизменяющие процессы) (рис. 5.16).



а *б* *в*

Рис. 5.16. Технологические схемы процессов комбинированной листовой формоизменяющей совмещенной штамповки: *а* – вытяжка - обжим; *б* – раздача - обжим; *в* – вытяжка – обжим - раздача; *1,3* – пуансон; *2* – заготовка; *4* – матрица; *5* – плита

Комбинированная совмещенно-последовательная штамповка объединяет несколько разнородных простых и комбинированных совмещенных процессов, выполняемых последовательно за каждый ход ползуна пресса на разных позициях комбинированного штампа при обеспечении оптимального расстояния между его соседними позициями.

5.5.2. Комбинированная объемная штамповка

Объемная комбинированная штамповка, так же как и листовая, делится на последовательную, совмещенную и совмещенно-последовательную. Последовательная и совмещенно-последовательная штамповка выполняется в комбинированных штампах последовательного действия и на многопозиционных пресс-автоматах. Примерами процессов последовательной и совмещенно-последовательной штамповки в штампах могут служить: осадка–выдавливание, выдавливание–пробивка, редуцирование–высадка; выдавливание–высадка и др.

Большие возможности имеет последовательная и совмещенно-последовательная штамповка на пресс-автоматах. При этом возможно создание процессов на основе объединения следующих штамповочных операций: отрезка–высадка, отрезка–редуцирование, отрезка–выдавливание–редуцирование, отрезка–выдавливание–редуцирование–высадка и др. Примером такой технологии может служить изготовление стержня свечи зажигания на многопозиционном автомате National Boltmaker, разработанном фирмой National Machinery. Стержень изготавливают из проволоки путем объединения операций отрезки, выдавливания, высадки, высадки–формовки, калибровки и накатки.

К группе процессов объемной совмещенной штамповки, например, относятся: осадка–выдавливание, выдавливание–высадка, высадка–прямое выдавливание, редуцирование–высадка, продольно-поперечное выдавливание (рис. 5.17).

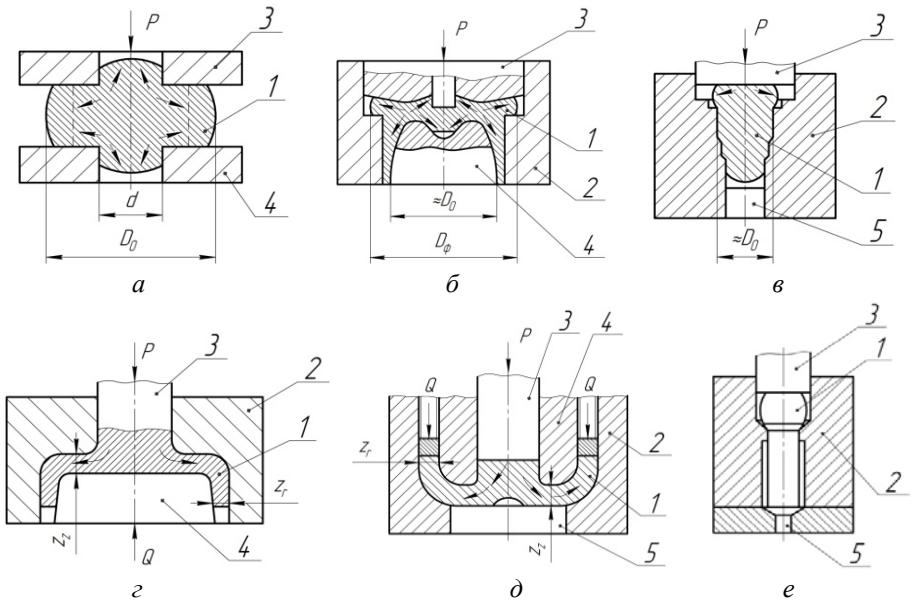


Рис. 5.17. Технологические схемы процессов комбинированной совмещенной штамповки: *а* – осадка–выдавливание; *б* – выдавливание–высадка; *в* – высадка–прямое выдавливание; *г, д* – продольно-поперечное выдавливание; *е* – редуцирование – высадка

Новым перспективным процессом получения полых деталей сложной формы следует считать процесс продольно-поперечного выдавливания (рис. 5.17,*г,д*), обеспечивающий возможность получения деталей диаметром, большим диаметра исходной прутковой заготовки. Процессы с применением редуцирования целесообразно использовать при изготовлении стержневых деталей, например типа сердечников. Эффективность процесса можно повысить применением двустороннего редуцирования, а также сочетанием редуцирования с подсадкой и высадкой, с образованием фасок. Редуцирование позволяет получать детали с припуском только на шлифование, а в некоторых случаях и без последующей обработки.

5.5.3. Комбинированная объемно-листовая штамповка

Комбинированная штамповка этого класса также может выполняться в комбинированных штампах последовательного, совмещенного и совмещенно-последовательного действия.

Характерными примерами процессов объемно-листовой штамповки являются процессы «вытяжка–выдавливание», «вытяжка с утонением–редуцирование», «вытяжка с подсадкой кромки» (рис. 5.18).

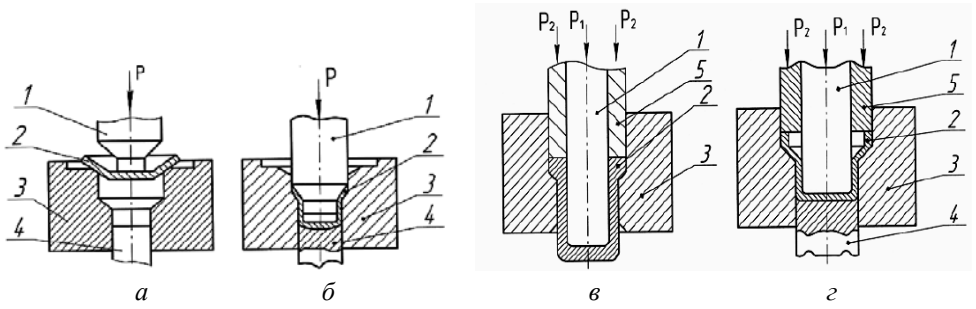


Рис. 5.18. Технологические схемы процессов объемно-листовой штамповки: *а*, *б* – вытяжка–выдавливание; *в* – вытяжка с утонением–редуцирование; *г* – вытяжка с подсадкой кромки; *1* – пуансон; *2* – заготовка; *3* – матрица; *4* – выталкиватель; *5* – подпор

Важной особенностью этих процессов служит возможность увеличения допустимых степеней деформации благодаря положительному влиянию дополнительных меридиональных сжимающих напряжений, уменьшающих меридиональные растягивающие напряжения в «опасном» сечении заготовки.

5.6. Способы штамповки

Способ штамповки есть определенная разновидность определенного процесса штамповки, учитывающая наиболее полно признаки его технологической схемы (обрабатываемой заготовки, штампуемой детали, технологической оснастки и оборудования).

Поэтому классификация способов штамповки выполняется по наиболее важным отличительным признакам технологической системы «обрабатываемая заготовка–технологическая оснастка–технологическое оборудование», а именно:

- по конструктивно-технологическим параметрам исходной заготовки и штампуемой детали;
- по схеме приложения дополнительных сил;
- по типу технологической среды, воздействующей на штампуемую заготовку;
- по виду взаимодействия заготовки и рабочего инструмента (по форме поверхности контакта и виду движения);
- по условиям штамповки (температуре и скорости процесса, характеру нагружения, условиям контактного трения);
- по типу технологического оборудования.

Конструктивно-технологические признаки заготовки и детали устанавливаются по технологическому классификатору (п. 1.8).

За дополнительные силы принимаем силы прижима, подпора, противодавления, противонатяжения и т.п. или их комбинации, которые существенно не изменяют основную технологическую схему процесса, но обеспечивают какой-либо положительный технологический эффект, например: предотвращают складкообразование при вытяжке без утонения и обжиме; повышают допустимые степени деформации при вытяжке с утонением; повышают качество поверхности среза детали при чистовой вырубке с силовым прижимом и другие эффекты. Обычно дополнительные силы отличаются по модулю от основных примерно на порядок в меньшую сторону. При классификации по типу технологической среды, воздействующей на заготовку, различают три группы способов штамповки: с применением жестких (твердых), податливых (подвижных) и смешанных сред. К жестким средам относятся традиционно применяемые для изготовления штампового инструмента инструментальные металлические, неметаллические, композиционные и армированные материалы; к податливым – эластомеры (резина, полиуретан), а также жидкость, газ, сыпучие материалы; к смешанным – сочетание твердых и податливых сред.

По виду взаимодействия заготовки и рабочего инструмента, согласно классификации академика Л.Н.Кошкина [4], выделим четыре основных и три переходных класса геометрического контакта заготовки и инструмента: точечный,

точечно-линейный, линейный, линейно-поверхностный, поверхностно-объемный, объемный. При точечном взаимодействии технологически эффективной является лишь одна точка инструмента, последовательно вступающая во взаимодействие со всеми точками обрабатываемой поверхности заготовки. Если известно уравнение обрабатываемой поверхности $F(x, y, z) = 0$, то траекториями рабочей точки могут быть любые линии, как угодно расположенные относительно заданной поверхности. Для общего случая обрабатываемой поверхности при изготовлении деталей типа тел вращения ротационным способом при определении вида движения заготовки степень сложности движения инструмента уменьшается, и в частных случаях оно может быть плоскостным и линейным. В процессах с линейным контактом общим геометрическим элементом инструмента и заготовки типа тела вращения является геометрическая образующая. Траектория и вид рабочего движения этого класса определяются формой геометрической направляющей поверхности. В зависимости от ее вида рабочее движение может быть пространственным, плоскостным или линейным. К процессам, выполняемым этим способом, относятся, например, ротационная вытяжка и обжим роликами.

К процессам с линейно-поверхностным контактом относятся процессы штамповки обкатыванием на сферодвижном прессователе [3]. В процессах с поверхностным контактом технологически эффективными являются все точки, принадлежащие поверхности инструмента. Для способов штамповки этого класса (традиционных способов штамповки на прессах) характерна независимость траекторий рабочего движения от формы поверхности и геометрической направляющей обрабатываемой заготовки. Траектория рабочего движения совпадает с осевой линией заготовки, а движение будет линейным, т.е. наиболее простым. Примером способа штамповки с реализацией механизма объемного взаимодействия между инструментом и заготовкой может служить магнитно-импульсная штамповка, при которой технологически эффективными являются все точки технологической среды – импульсного электромагнитного поля.

В основу классификации способов штамповки по температурным условиям принято положение об одновременном протекании при пластической деформации основных конкурирующих физических процессов в металле: упрочнения и разупрочнения.

В соответствии с этим установлены граничные значения относительных гомологических температур $\bar{t} = t/t_{\text{пл}}$, где $t, t_{\text{пл}}$ – температура процесса и плавления соответственно в градусах Кельвина, характеризующих переход от способов холодной к горячей штамповке:

- холодная штамповка с полным деформационным упрочнением – $\bar{t} < \bar{t}_{\text{н.о}}$;

- холодная штамповка с неполным деформационным упрочнением – $\bar{t}_{\text{н.о}} < \bar{t} < \bar{t}_{\text{н.р}}$;
- полугорячая штамповка – $\bar{t}_{\text{н.о}} < \bar{t} < \bar{t}_{\text{к.р}}$;
- горячая штамповка – $t > t_{\text{к.р}}$.

Здесь $\bar{t}_{\text{н.о}} = t_{\text{н.о}} / t_{\text{пл}}$, $\bar{t}_{\text{н.р}} = t_{\text{н.р}} / t_{\text{пл}}$, $\bar{t}_{\text{к.р}} = t_{\text{к.р}} / t_{\text{пл}}$ – гомологические температуры, соответствующие началу отдыха, началу и концу рекристаллизации соответственно.

Классификация способов штамповки по скоростным параметрам основана на анализе условий динамического равновесия деформируемых заготовок, в соответствии с которым различают статические (квазистатические), скоростные, высокоскоростные (динамические), импульсные способы.

Для статических процессов полностью применимы условия статического равновесия, при которых волновыми явлениями и инерционными силами при пластической деформации пренебрегают. При этом различают статические релаксационные и деформационные процессы. В первом случае зависимость сопротивления деформированию от скорости деформации имеет линейный характер, во втором случае – вид степенной функции.

Высокоскоростные (динамические) процессы штамповки характеризуются высокими ударными скоростями приложения нагрузки, малой, исчисляемой миллисекундами, длительностью процесса и, как следствие, существенным инерционным сопротивлением, значительной неравномерностью напряженного и деформированного состояний, значительным повышением сопротивления деформированию за счет инерционных сил.

Скоростные процессы занимают промежуточное положение между статическими и высокоскоростными (динамическими).

Импульсные процессы характеризуются кратковременностью действия, измеряемого микросекундами. Импульсное нагружение имеет место при ударе и взрыве. В деформируемом теле при импульсном нагружении возникают возмущения различной природы (нагрузки, разгрузки, отражения и др.), распространяющиеся с определенными конечными скоростями в виде волн возмущений (волн нагрузки, разгрузки, отраженных волн). Возмущения, распространяясь в деформируемом теле, образуют области возмущений, которые расширяются с течением времени, и ограничены частью поверхности тела и поверхностью фронта волны напряжений. Каждой области возмущений соответствует свое напряженно-деформированное состояние. Сопротивление деформированию определяется, главным образом, инерционным сопротивлением, при этом статической составляющей можно пренебречь.

Классификация способов штамповки по законам нагружения во времени предусматривает их деление на непрерывные, полунепрерывные и прерывистые с наложением и без наложения на основные процессы механических колебаний различного рода и частоты.

По условиям контактного трения выделяют способы штамповки, в которых реализуются условия граничного и жидкостного трения при действии активных, пассивных и смешанных сил трения. Такое деление определяется направлением сил трения по отношению к направлению течения металла заготовки при штамповке и выявляемым при этом положительным, отрицательным и смешанным эффектам воздействия на напряжения и усилия. Разделение способов штамповки по типу используемого технологического оборудования должно соответствовать принятой классификации акад. Л.Н. Кошкина [4]:

- штамповка на раздельном прессовом оборудовании;
- штамповка на станках (машинах ротационного типа);
- штамповка на АРЛ и РКЛ.

Библиографический список

1. *Агеев Н.П.*, Данилин Г.А., Огородников В.П. Технология производства патронов стрелкового оружия. Ч.1. Технологические основы проектирования патронов: учебник / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2005. 352 с.

2. *Лясников А.В.*, Агеев Н.П., Данилин Г.А. и др. Сопротивление материалов пластическому деформированию в приложениях к процессам обработки металлов давлением / Под ред. А.В. Лясникова. СПб.: «Внешторгиздат-Петербург», 1995. 527 с.

3. *Агеев Н.П.*, Данилин Г.А., Федина Т.С. Прогрессивные способы комбинированного формообразования в листовой и объемной штамповке. М.: ЦНИИНТИ, 1981. 78 с.

4. *Кошкин Л.Н.* Роторные и роторно-конвейерные линии. М.: Машиностроение, 1982. 335 с.

Ч А С Т Ь II. ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА

6. ПРОЦЕССЫ ВЫРУБКИ И ПРОБИВКИ

6.1. Технологические особенности процессов

Согласно определению ***вырубка*** – это процесс отделения части заготовки по замкнутому контуру путем сдвига с удалением детали.

Пробивка – процесс, аналогичный процессу вырубки, но предназначенный для получения отверстий. Поэтому по завершении процесса из матрицы удаляется не деталь, а отход.

Приближенные схемы машинной диаграммы «усилие P – путь h» инструмента за время процесса и действующие в зоне очага пластической деформации (ОПД) силы показаны на рис. 6.1.

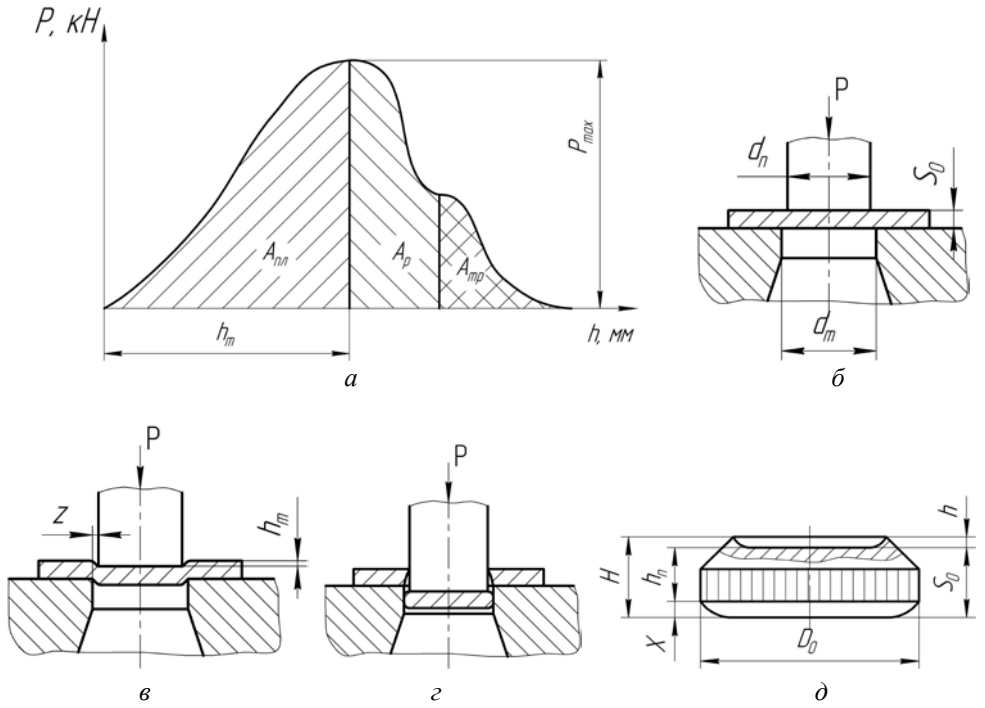
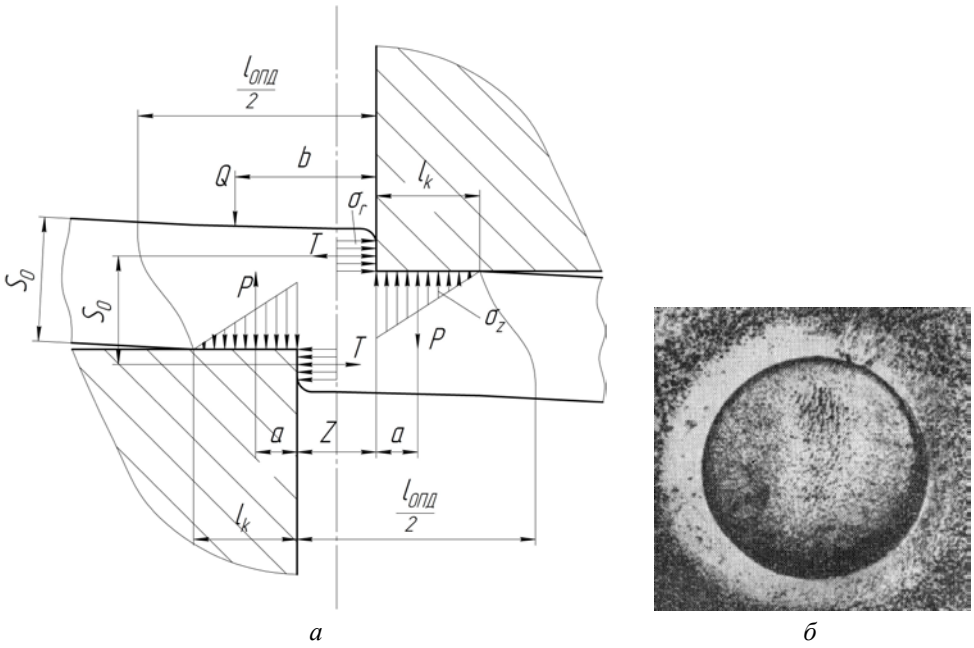


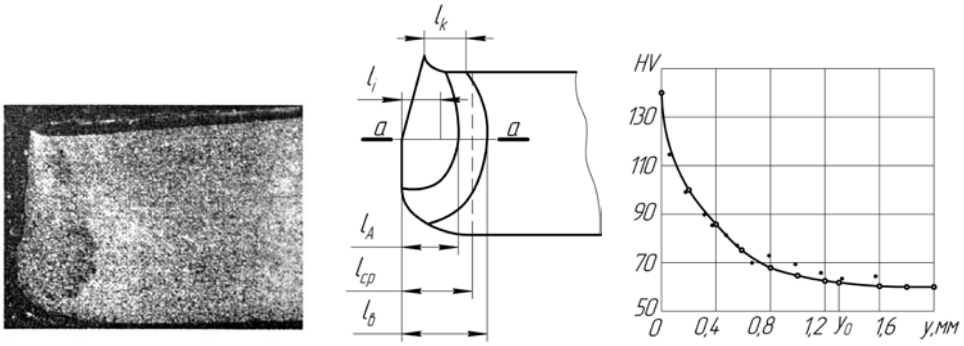
Рис. 6.1. Машинная диаграмма «усилие деформирования – путь инструмента» (*а*) и стадии формообразования заготовки: *б* – начальная (упругопластическое деформирование); *в* – конец стадии пластического деформирования и начало стадии разрушения; *г* – конечная стадия разрушения; *д* – вырубленная заготовка

Схемы формирования ОПД представлены на рис. 6.2 и 6.3.



а *б*

Рис. 6.2. Схема сил, действующих на заготовку в процессах вырубки и пробивки (*а*), и зона смятия (кольцевой отпечаток) по контуру режущих кромок матрицы (*б*)



а *б* *в*

Рис. 6.3. Микроструктура материала заготовки (*а*) в зоне ОПД после вырубки и рекристализационного отжига, схема ОПД (*б*) и распределения микротвердости (*в*) по сечению «а-а» ОПД

Из анализа этих схем можно сделать следующие выводы:

1. Процесс нестационарен (все параметры изменяются во времени).

2. Очаг пластической деформации формируется на второй стадии процесса в зоне режущих кромок рабочего инструмента, имеет локальный характер и размеры в плоскости листа $l_{\text{ОПД}}$, не превышающие одной толщины заготовки:

$$l_{\text{ОПД}}/2S_0 = l_{\text{ср}}/S_0 \cong 0{,}44 + 0{,}87\, z/S_0 ,$$

где $l_{\text{ср}} = l_{\text{ОПД}}/2$; z – односторонний технологический зазор; S_0 – толщина исходной заготовки (полосы, ленты). С увеличением скорости процесса и уменьшением относительного зазора размер ОПД – $l_{\text{ОПД}}$ уменьшается.

3. В зоне ОПД действуют активные силы P и реактивные T (силы распора) и ввиду наличия зазора между матрицей и пуансоном Z – изгибающие моменты от сил P и T соответственно:

$$M_{\text{р}} = P \cdot \left(Z + 2/3 \cdot l_{\text{к}}\right);\ M_{\text{т}} \cong T \cdot S_0 ,$$

где $l_{\text{к}}$ – ширина зоны контакта заготовки с инструментом. При применении прижима действует также момент от силы прижима Q, $M_Q = Q \cdot b$, где b – плечо приложения силы Q при вырубке (пробивке) по замкнутому криволинейному контуру. Поворот части заготовки вокруг кривой линии под действием момента $M_{\text{р}}$ сопровождается появлением тангенциальных сжимающих напряжений σ_θ, препятствующих этому повороту, и, соответственно, момента внутренних сил – момента сопротивления пластическому изгибу:

$$M_\sigma \cong 1/4 \cdot \sigma_i \cdot \pi \cdot D_0 \cdot S_0^2 .$$

С учетом изложенного приближенное условие равенства моментов в зоне ОПД будет иметь вид:

$$M_{\text{р}} \cong M_{\text{т}} + M_\sigma + M_Q \qquad (6.1)$$

или

$$P \cdot \left(Z + 2/3 \cdot l_{\text{к}}\right) \cong T \cdot S_0 + 1/4 \cdot \sigma_i \cdot \pi \cdot D_0 \cdot S_0^2 + Q \cdot b , \qquad (6.2)$$

откуда следует, что усилие распора T может быть определено из выражения

$$T = P \cdot \left(Z/S_0 + 2/3 \cdot l_{\text{к}}/S_0\right) - 1/4 \cdot \sigma_i \cdot \pi \cdot D_0 \cdot S_0 - Q \cdot b/S_0 .$$

С увеличением технологического усилия P, относительного одностороннего зазора Z/S_0 и относительной ширины площади контакта $l_{\text{к}}/S_0$ усилие распора T возрастает, что отрицательно влияет на стойкость рабочего инструмента и качество штампуемых деталей. Обратное, положительное, влияние на силу T, способствующее ее уменьшению, оказывает применение прижи-

ма, повышение предела текучести материала ($\sigma_i \cong \sigma_{0,2} = f(\varepsilon_i)$) и толщины заготовки.

4. В зоне ОПД схемы деформированного и напряженного состояний соответствуют сдвигу на срединной по толщине заготовки поверхности ($\varepsilon_r > 0$, $\varepsilon_z < 0$, $\varepsilon_\theta \cong 0$, $\nu_\varepsilon \cong 0$, $\sigma_r > 0$, $\sigma_z < 0$, $\sigma_\theta \cong 0$, $k \cong 0$):

$$\sigma_{\text{ср}} = \tau_{\max} = \frac{\sigma_r - \sigma_z}{2} = \frac{\sigma_{ij}}{\sqrt{3}};\ \ \sigma_{ij} = f(e_{i\text{ср}}).$$

Величина средней степени деформации в момент начала разрушения приближенно определяется по формуле

$$e_{i\text{ср}} \cong 2/\sqrt{3} \cdot \ln \frac{1}{1 - h_m / S_0}, \tag{6.3}$$

где $h_m \cong h_{\text{п}}$ – глубина внедрения пуансона в металл в момент начала разрушения (справочная величина); $h_{\text{п}}$ – высота блестящего пояска на заготовке (детали). Сопротивление срезу $\sigma_{\text{ср}}$ возрастает с увеличением прочностных свойств материала ($\sigma_{\text{в}}$), относительной толщины вырубаемой заготовки S_0/D_0, уменьшением относительного зазора z/S_0, увеличением скорости деформации $\dot{\varepsilon}_i$. Влияние относительной толщины вырубаемой заготовки, характеристик прочности ее материала и относительного зазора может быть учтено приближенно следующей формулой ($S_0 = 4\ldots10$ мм):

$$\sigma_{\text{ср}} = \left[a \cdot (S_0/D_0) + b\right] \cdot \sigma_{\text{в}}, \tag{6.4}$$

где $a = 1{,}2$, $b = 0{,}6$ при $2z/z_0 = 0{,}15$; $a = 1{,}43$, $b = 0{,}62$ при $2z/z_0 = 0{,}10$; $a = 2{,}0$, $b = 0{,}62$ при $2z/z_0 = 0{,}05$;

5. Максимальное технологическое усилие при вырубке и пробивке инструментом с плоскими режущими кромками определяется по формуле

$$P_{\max} = 1{,}3 \cdot \pi \cdot D_0 \cdot S_0 \cdot \sigma_{\text{ср}} \tag{6.5}$$

при применении инструмента со скошенными режущими кромками

– при $H > S_0$

$$P_{\max} = 2{,}5 \cdot D_0 \cdot S_0 \cdot \sigma_{\text{ср}} \cdot k \cdot \left(1 + 0{,}1\left(H/S_0 \cdot k\right)\right) \arcsin S_0/H; \tag{6.6}$$

– при $H < S_0$

$$P_{\max} = 4{,}7 \frac{n_{\text{в}} \cdot D_0 \cdot S_0}{1{,}2 - 0{,}2 \cdot H/S_0} \sigma_{\text{ср}} \cdot \left(1 + 0{,}1\left(H/n_{\text{в}} S_0\right)\right), \tag{6.7}$$

где k, $n_{\text{в}}$ – функция от h_m/S_0 и H/S_0 (коэффициенты k и $n_{\text{в}}$ уменьшаются с увеличением H/S_0 и уменьшением h_m/S_0).

6. С увеличением относительной толщины S_0/D_0 вырубаемой детали или пробиваемого отверстия увеличиваются сжимающие напряжения, действующие на пуансон, что следует из условия равенства усилия, воспринимаемого пуансоном $P_{\text{п}}$, технологическому усилию $P_{\text{т}}$, т.е.

$$P_{\text{п}} = \sigma_{\text{сж}}\left(\pi \cdot d_{\text{п}}^2/4\right) \cong P_{\text{тех}} = \pi \cdot D_0 \cdot S_0 \cdot \sigma_{\text{ср}},$$

где $d_{\text{п}} = D_0$.

Отсюда

$$\sigma_{\text{ñæ}} = \sigma_{\text{ñð}} \cdot 4 \cdot S_0/D_0 . \qquad (6.8)$$

Из этого соотношения следует, что сжимающие напряжения $\sigma_{\text{сж}}$ с уменьшением диаметра пуансона возрастают в гиперболической зависимости. Соответственно возрастает и влияние продольного изгиба.

При обычных способах крепления пуансона минимальный диаметр пробиваемого отверстия при удовлетворительной стойкости пуансонов будет приближенно равен толщине заготовки. При применении конструкции штампа, исключающего продольный изгиб пуансона, возможна пробивка отверстия с относительным диаметром $D_0/S_0 = 0{,}25 \div 0{,}40$.

На рис 6.4 показан макрошлиф заготовки после промежуточной стадии пробивки глубокого отверстия, предшествующей началу разрушения заготовки. Эта стадия процесса по схеме формообразования соответствует прошивке с вытеснением металла из под торца пуансона. Сдвиг одной части заготовки относительно другой начинается при толщине перемычки $S_{\text{п}} \cong D_0$.

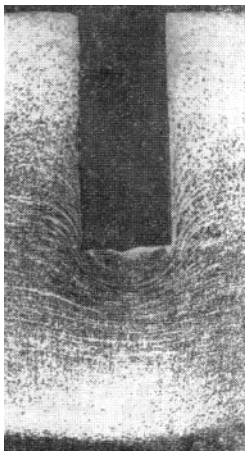


Рис. 6.4. Макрошлиф заготовки после промежуточной стадии пробивки глубокого отверстия

6.2. Технологические возможности и ограничения процессов

Технологические возможности процессов листовой штамповки определяются областью ее рационального (оптимального) применения по основным конструктивно-технологическим характеристикам изготавливаемых деталей (заготовок, полуфабрикатов) при оптимальных физико-механических и технико-экономических показателях реализуемых процессов штамповки. Действующая и управляемая система ограничений в процессах штамповки должна гарантировать бездефектное изготовление деталей с заданными конструктивными характеристиками и физико-механическими свойствами (структурой

металла, механическими свойствами) при экономически целесообразной стойкости рабочего инструмента и оптимальных затратах различного вида ресурсов.

Система ограничений и технологические возможности процессов штамповки зависят от технологических особенностей процессов вырубки и пробивки и способов их выполнения:

- условий формирования очага (очагов) интенсивной пластической деформации и разрушения в деформируемой заготовке;
- напряженного и деформированного состояния заготовки в очагах пластической деформации;
- условий деформирования (температуры, скорости деформирования и деформации, характера нагружения, условий контактного трения, степени деформации).

На основе анализа рассмотренных технологических особенностей процессов вырубки и пробивки устанавливаются условия ограничения их применения и формируются технологические требования к конструкции штампуемой детали (заготовки). Для оптимизации процесса штамповки необходимо знать состав основных технологических факторов, влияющих на него и качество штампуемых деталей.

К основным условиям ограничения процессов штамповки этого вида относятся следующие.

1. Условия допускаемых технологических усилий пресса

$$P_{\text{т}\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} P_{\text{т}_i} \le [P] = P_{\text{н}} / k_{\text{р}} , \qquad (6.9)$$

где $P_{\text{т}\Sigma}$ – требуемое суммарное усилие при работе на многопозиционном комбинированном штампе; $P_{\text{т}_i} = P_{i\max}(1 + k_{\text{пр}})$ – усилие на одной позиции штампа при удалений деталей на провал через отверстия в матрице с жестким съемом полосы ($k_{\text{пр}} = 0{,}05 \div 0{,}10$); $P_{\text{т}_i} = P_{i\max}(1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{сн}})$ – усилие на одной позиции штампа при работе на провал в штампе с пружинным съемником ($k_{\text{сн}} = 0{,}06 \div 0{,}20$ в зависимости от толщины заготовки S_0 и типа штампа, одно- или многопозиционного); $P_{\text{т}_i} = P_{i\max}(1 + k_{\text{вт}} + k_{\text{сн}})$ – усилие на одной позиции штампа при работе с возвратом деталей или отходов в исходное положение после вырубки и пробивки ($k_{\text{вт}} = 0{,}07 \div 0{,}14$); $[P]$, $P_{\text{н}}$, $k_{\text{р}}$ – допускаемое номинальное усилие пресса и коэффициент запаса ($k_{\text{р}} > 1$ назначается по графику допускаемых усилий пресса с учетом требуемой величины рабочего хода и состояния пресса)

2. Условие прочности пуансона на сжатие

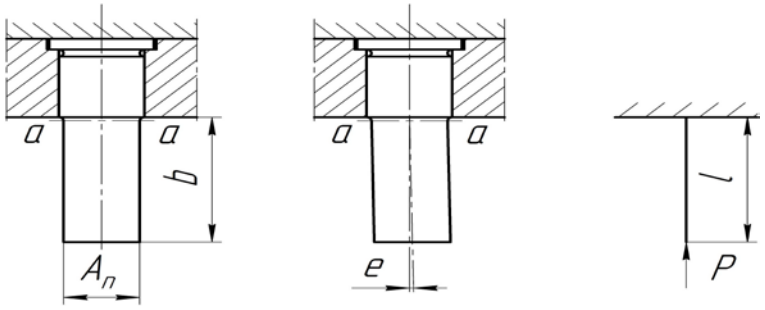
- без учета смещения оси пуансона относительно матрицы (рис. 6.5,*а*,*в*)

$$\sigma_{\text{сж}} = P_{i\max} / F_{\text{п}} \le [\sigma_{\text{сж}}] ; \qquad (6.10)$$

- с учетом смещения оси пуансона относительно оси матрицы (рис. 6.5, *б*)

$$\sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{и}} \le [\sigma_{\text{сж}}], \tag{6.11}$$

где $\sigma_{\text{и}} = M_{\text{и}}/W$, $M_{\text{и}} = P_{i\max} e$ – изгибающие напряжение и момент соответственно; $W = \pi \cdot d^3/3 \cong 0{,}1d^3$ – момент сопротивления сечения; e – эксцентриситет приложения силы $P_{i\max}$, $[\sigma_{\text{сж}}]$ – допускаемые напряжения на сжатие материала пуансона с учетом применяемого вида термической обработки.



а *б* *в*

Рис. 6.5. Схема установки и нагружения пуансона при отсутствии направляющей втулки (плиты): *а* – схема установки пуансона при отсутствии смещения его оси относительно оси матрицы; *б* – схема искривления пуансона при смещении его оси относительно матрицы; *в* – расчетная схема

Допускаемое из условия прочности на сжатие значение отношения поперечного размера пуансона к толщине заготовки или пробиваемой перегородки заготовки гильзы определяются из следующих неравенств:

- для цилиндрических пуансонов ($e = 0$)

$$d_{\text{п}}/S_0 = D_0/S_0 \ge 5{,}2(\sigma_{\text{ср}}/[\sigma_{\text{сж}}]); \tag{6.12}$$

- для цилиндрических пуансонов ($e = z$)

$$d_{\text{п}}/S_0 = D_0/S_0 \ge 5{,}2 \cdot (1 + 8 \cdot z/D_0)(\sigma_{\text{ср}}/[\sigma_{\text{сж}}]). \tag{6.13}$$

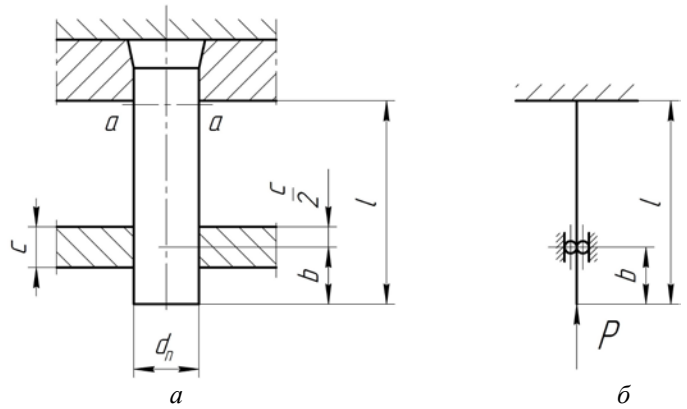
Для других по форме поперечных сечений устанавливаются свои соотношения размеров.

3. Условие прочности пуансона на продольный изгиб

$$P_{\max} \le \frac{1}{k_y} P_{\text{кр}}, \tag{6.14}$$

где $P_{\text{кр}} = \eta(EJ/l^2)$; $J = \pi d^4/64 \cong 0{,}05d^4$ – осевой момент инерции для круглого сечения; $l/d_{\text{п}} \cong l/D_0 \le 0{,}10\sqrt{d_{\text{п}}/S_0}\sqrt{E/\sigma_{\text{ср}}}$ – относительная длина свободной незакрепленной части пуансона при отсутствии промежуточной

опоры (рис. 6.5,*а*,*в*); $l/d_{\text{п}} \cong l/D_0 \le 0{,}11\sqrt{\eta}\sqrt{d_{\text{п}}/S_0}\sqrt{E/\sigma_{\text{ср}}}$ – то же при наличии промежуточной опоры (рис. 6.6); η – коэффициент, учитывающий условия закрепления, характер нагружения и изменение сечения по высоте пуансона (при жестком закреплении, нагружении в торец $\eta = 2{,}463$ при $b/l = 0$; $\eta = 6{,}260$ при $b/l = 0{,}5$).



а *б*

Рис. 6.6. Схема установки и нагружения пуансона с применением направляющей втулки (плиты): *а* – схема установки пуансона; *б* – расчетная схема

4. Условие прочности матриц (рис. 6.7):

- на изгиб

$$\sigma_{\text{и}} = 2{,}5P_{\max}/H_{\text{м}}^2\left(1-\frac{2}{3}\frac{d_{\text{п}}}{d_{\text{ом}}}\right) \le [\sigma_{\text{и}}], \qquad (6.15)$$

где $H_{\text{м}} \ge \left[\frac{2{,}5P_{\max}}{[\sigma_{\text{и}}]}\left(1-\frac{2}{3}\frac{d_{\text{п}}}{d_{\text{ом}}}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$;

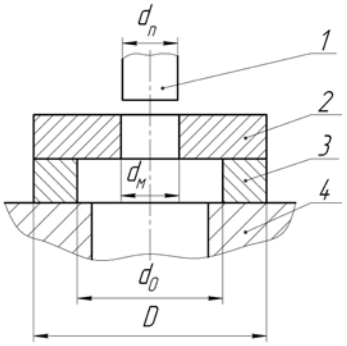


Рис. 6.7. Схема установки кольцевой матрицы: *1* – пуансон; *2* – матрица; *3* – кольцо; *4* – плита нижняя

- на разрыв

$$\sigma_{\text{р}} = 0{,}4\left(P_{\max}/F_{\text{м}}\right) \le [\sigma_{\text{р}}], \qquad (6.16)$$

где $\sigma_{\text{и}}$, $[\sigma_{\text{и}}]$, $\sigma_{\text{р}}$, $[\sigma_{\text{р}}]$ – действующие и допускаемые напряжения на изгиб и разрыв соответственно; $F_{\text{м}} = H_{\text{м}}\left(D_{\text{м}} - d_{\text{м}}\right)$ – площадь поперечного сечения стенки матрицы; $D_{\text{м}}$, $d_{\text{м}}$ – наружный и внутренний диаметры матрицы; $H_{\text{м}}$ – высота матрицы; $d_{0\text{м}}$ – внутренний диаметр опорной плиты для матрицы.

5. Условие рационального использования материала при раскрое из полосы (ленты)

$$\eta \geq [\eta], \qquad (6.17)$$

где η, $[\eta]$ – фактическое и допустимое из условий технико-экономической целесообразности значения коэффициента использования металла (КИМ). Принимая ширину перемычек при раскрое полосы $a/S_0 = b/S_0 = 1{,}0$, получим формулы для расчета КИМ при вырубке кружков:

- для однорядного раскроя

$$\eta = \frac{0{,}785}{\left(1+\frac{S_0}{D_0}\right)\cdot\left(1+2\frac{S_0}{D_0}\right)}100\%; \qquad (6.18а)$$

- для многорядного параллельного раскроя

$$\eta = \frac{0{,}785}{\left(1+\frac{S_0}{D_0}\right)\cdot\left(1+\frac{S_0}{D_0}\left(1+\frac{1}{n}\right)\right)}100\%; \qquad (6.18б)$$

- для многорядного шахматного раскроя

$$\eta = \frac{0{,}785}{\left(1+\frac{S_0}{D_0}\right)\cdot\left\{\frac{\sqrt{3}}{2}+\left(1-\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\frac{1}{n}+\frac{S_0}{D_0}\left[\frac{\sqrt{3}}{2}+\frac{1}{n}\left(2-\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\right]\right\}}100\%. \qquad (6.18в)$$

На рис. 6.8 показана зависимость коэффицента η от относительной толщины S_0/D_0 вырубаемой заготовки. С увеличением S_0/D_0 КИМ снижается.

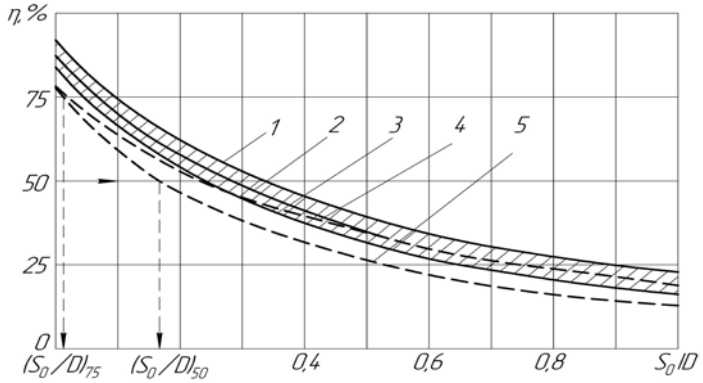


Рис. 6.8. Влияние относительной толщины штампуемой детали S_0/D_0 на коэффициент использования металла η при различных видах раскроя: *1* – многорядном $n \to \infty$ шахматном; *2* – четырехрядном шахматном; *3* – двухрядном шахматном; *4* – многорядном $n \to \infty$ параллельном; *5* – однорядном

6. Условие оптимизации процесса по параметрам качества штампуемой заготовки (детали), исключающее образование заусенцев, значительных прогибов и утяжины:

$$\left(\frac{z}{S_0}\right)_{\text{ОПТ}} = \left(1-\frac{h_m}{S_0}\right)\text{tg}\beta \le \left[\frac{z}{S_0}\right], \qquad (6.19)$$

где h_m/S_0, β – технологические свойства материала детали (h_m/S_0 – показатель относительной степени деформации материала до начала разрушения; β – угол наклона образующей поверхности скола (разрушения) к оси вырубаемой заготовки (детали); $[z/S_0]$ – допускаемое значение относительного зазора.

Это простое геометрическое соотношение предполагает, что на заключительной, третьей, стадии процесса макротрещины, появившиеся у режущих кромок пуансона и матрицы, распространяются по одной конической поверхности (поверхности скола) до встречи друг с другом с образованием единой магистральной поверхности разрушения (рис. 6.9,*а*). Последнее исключает возможность развития макротрещин на «параллельных» поверхностях и образования промежуточных прослоек с их обрывом и формированием некачественной поверхности среза с заусенцами и микродефектами по периметру вырубаемой заготовки (рис. 6.9).

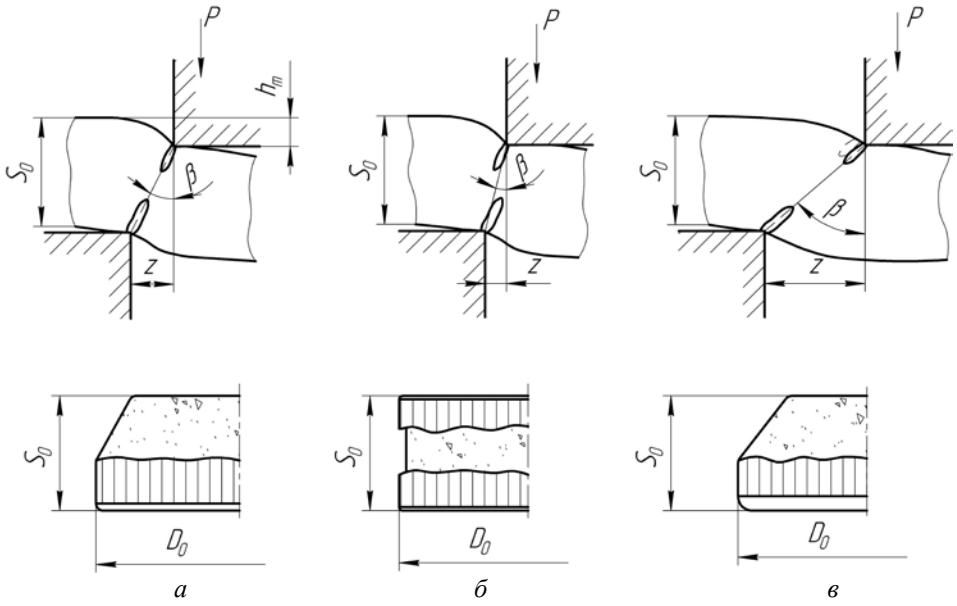


Рис. 6.9. Влияние величины зазора на характер разрушения заготовки при вырубке:
а – оптимальный зазор; *б* – зазор меньше оптимального; *в* – зазор больше оптимального

Ввиду неизбежного разброса числовых значений параметров h_m/S_0 и β для реальных материалов и заготовок оптимальный зазор задается интервалом его значений $(z_{\min} \div z_{\max})/S_0$, а допускаемое значение с определенной вероятностью должно исключить появление дефектов, нарушающих качество штампуемых деталей. Величина допустимого относительного зазора будет определять экономически целесообразные нормы стойкости рабочего инструмента и нормы точности штампуемых деталей.

6.3. Технологичность конструкции штампуемых заготовок и деталей

6.3.1. Конструктивно-технологические параметры заготовок и деталей, штампуемых способами вырубки и пробивки

В соответствии с принципами и структурой общей классификации металлических элементов патронов выделяем с учетом условий ограничений деформации следующие конструктивно-технологические параметры штампуемых деталей:

а) безразмерные геометрические параметры:

- относительная толщина S_0/D_0;
- относительная точность $\left(T_{\text{д}}^{\text{в}} - T_{\text{д}}^{\text{н}}\right)/D_0$;

б) безразмерные физико-механические (технологические) свойства материала:

- параметры штампуемости;
- относительная величина сопротивления срезу материала $\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{в}}$;
- относительная глубина внедрения инструмента в металл до начала разрушения h_m/S_0;

в) размерные параметры:

- габаритные размеры S_0, D_0;
- масса деталей (заготовки) M_0;

г) применяемые материалы.

В соответствии с классификатором металлических элементов патронов к плоским отнесены детали с высотой $H/D < 0{,}15$. Этот уровень $S_0/D_0 \le 0{,}15$ можно применить и для вырубаемых заготовок, тогда как для пробиваемых отверстий его следует увеличить до значения $S_0/D_0 \le 1{,}0$.

Параметры относительной точности назначаются в зависимости от габаритных размеров штампуемых деталей (диаметров заготовок и пробиваемых отверстий D_0 и толщины заготовок (перемычек) S_0).

Габаритные размеры и масса заготовок находятся в интервалах значений классификатора металлических элементов изделий.

6.3.2. Оценка технологичности конструкции штампуемых деталей

В соответствии с выполненным анализом выделим группу технических показателей ТКИ, а их контрольные уровни технологичности определим приближенно с учетом условий ограничения деформации в процессах вырубки и пробивки (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Контрольные уровни показателей ТКИ заготовок и деталей, изготавливаемых вырубкой и пробивкой

Группа показателей ТКИ	Вид показателя ТКИ	Уровень ТКИ		
		высокий	средний	низкий
1	2	3	4	5
Расход материала	Масса детали, кг	Менее 0,1	0,1…1,0	Более 1,0
	Коэффициент использования материала	Более 75	75…50	Менее 50
Штампуемость материала	Относительная величина сопротивления срезу материала $\sigma_{ср}/\sigma_{в}$	Менее 0,60	0,60…0,80	Более 0,80
	Относительная глубина внедрения инструмента в металл до начала разрушения h_m/S_0	Более 0,40	0,40…0,20	Менее 0,20
Степень сложности геометрической формы	Общая форма детали	Плоская осесимметричная	Плоская равносимметричная $\frac{A}{B}=1{,}0$	Плоская несимметричная и пространственной формы $\frac{A}{B}\neq 1{,}0$
	Относительная толщина вырубаемой детали S_0/D_0	Менее 0,05	0,05..0,25	Более 0,25
	Относительный диаметр пробиваемого отверстия d/S_0	Более 5,0	5,0…1,0	Менее 1,0
	Количество одновременно штампуемых способами вырубки, пробивки конструктивных элементов детали	1	1…10	Более 10
	Относительное расстояние между контурами рядом пробиваемых отверстий b/S_0	Более 3,0	2,0…3,0	Менее 2,0
	Относительное расстояние от оси пробиваемого в дне полости отверстия до стенки полости детали (конструктивного элемента детали) $C/S_0 = r/S_0 + 0{,}5$	Более $\frac{r}{S_0}+0{,}5$	$\frac{r}{S_0}+0{,}5$	Менее $\frac{r}{S_0}+0{,}5$
	Допускаемые отклонения на размеры вырубаемого (пробиваемого) контура	$H14/h14$	$H12/h12$ … $H11/h11$	Выше $H11/h11$

6.4. Расчет технологических параметров процессов вырубки и пробивки

Основными параметрами процессов вырубки и пробивки являются:

- условное $\sigma_{ср}$ сопротивление срезу;
- относительная глубина внедрения пуансона в металл до начала появления трещин $h_м/S_0$ ($h_м$ – абсолютная глубина внедрения пуансона в металл до начала появления трещин, мм; S_0 – толщина исходной заготовки, мм);
- максимальное усилие деформирования P_{max};
- усилие проталкивания детали (отхода) $P_{пр}$;
- усилие съема полосы (ленты) с пуансона $P_{сн}$;
- полная работа формоизменения A.

Сопротивление металла срезу является одним из показателей механических свойств материала заготовки и определяется по результатам технологических испытаний на срез при определенных зазорах и скорости процесса. Условное сопротивление материала срезу определяется как отношение максимального усилия вырубки (пробивки) P_{max} к полной боковой поверхности штампуемой детали F т.е.

$$\sigma_{ср} = P_{max}/F = P_{max}/LS_0 ,$$

где L – длина периметра вырубаемой детали или пробиваемого отверстия (при вырубке и пробивке круглых деталей и отверстий $L = \pi D_0$, где D_0 – диаметр детали или отверстия).

Значения $\sigma_{ср}$ назначают по опытным данным (табл. 6.2), а также могут быть определены по формулам (6.4) или по приближенному соотношению

$$\sigma_{ср} = (0{,}70 \div 0{,}85)\sigma_в \qquad (6.20)$$

или опытным данным (рис. 6.10).

Таблица 6.2

Сопротивление срезу $\sigma_{ср}$ и относительная глубина внедрения пуансона в металл до начала разрушения для различных металлов

Материал	Состояние материала					
	Отожженный			Наклепанный		
	$\sigma_{ср}$, кгс/мм^2	$h_м/S_0$, %		$\sigma_{ср}$, кгс/мм^2	$h_м/S_0$, %	
		S_0 <4, мм	S_0 > 4, мм		S_0 <4, мм	S_0 > 4, м
Сталь 08	25-28	55-60	-	32-35	50	-
Сталь 10 кп, 15кп, Ст.1	28-30	50-55	-	35-38	50	-
Сталь 20, Ст.2	30-32	50	45	38-42	45	38
Сталь 25, Ст.3	32-35	47	40	42-45	40	28
Сталь 35, Ст.5	40-45	40	27	50-55	30	17
Медь М1, М2, М3	18-22	55	-	25-28	30	-
Латунь Л62, Л68	22-28	55-60	50	35-40	20-30	20
Алюминий АД, АД1	7-9	55-65	60	11-15	40-50	30

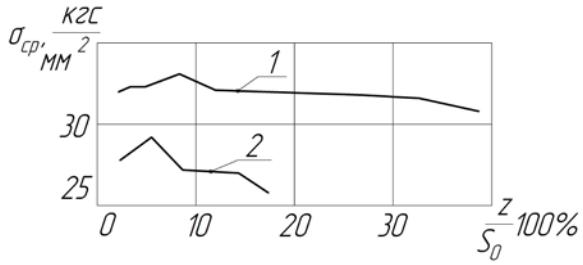


Рис. 6.10. Влияние относительного зазора на сопротивление срезу листовых материалов: *1* – ст.18ЮА; *2* – биметалл 1

Большие значения коэффициента в формуле (6.20) назначаются для тонких материалов ($S_0 = 0{,}5 \div 2{,}0$ мм) при минимальных значениях оптимальных зазоров и более высоких значениях относительных толщин штампуемых деталей – ($S_0/d > 0{,}1$) . Влияние относительной толщины S_0/d на сопротивление срезу $\sigma_{ср}$ для сталей ($S_0 = 4 \div 10$ мм) может быть учтено формулами (6.4).

Механические свойства материалов, применяемых в основном производстве отрасли, приведены в табл. 6.3.

Относительная глубина внедрения пуансона в металл до начала разрушения ($h_м/S_0$) характеризует пластические свойства материала на разделительных операциях. Величина $h_м$ *со*ответствует моменту достижения максимального усилия вырубки (пробивки) P_{max} (см. рис. 6.1,*∂*) и определяет высоту блестящего пояска на готовой детали $h_п$: $h_п/S_0 \approx h_м/S_0$. Значения $h_м/S_0$ устанавливают по опытным данным (табл. 6.3).

Т а б л и ц а 6.3

Механические свойства металлов

Материал	Показатели сопротивления деформированию, кгс/мм^2				Показатели пластичности, %				
	$\sigma_т(\sigma_{0,2})$	$\sigma_в$	σ_{iy}	$S_к$	ε_{iy}	ε_{ip}	δ	ψ	$h_м/S_0$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сталь углеродистая качественная конструкционная 08кп	18	32	-	-	-	-	31	60	55-60
Сталь горячекатаная 11кп	18	29-31	39-42	69-72	28-31	140-150	42-48	75-78	40
Сталь углеродистая холоднокатаная 18ЮА	24-25	41	54	98-100	27-28	150-160	38	79-81	42

Окончание табл. 6.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сталь углеродистая высококачественная горячекатаная 18ЮА	32	46	58-59	95-96	24	120	38-39	70-71	-
Биметалл 1	25-26	37	48-49	85	28	140	38-39	76	-
Биметалл 3	25	34-35	45-47	82-89	29-30	160-170	44	79-81	42
Латунь Л68	11	33	50-51	87	42-44	140	63	76	-
Томпак Л96	12,5	31,5	-	-	-	-	-	61	58

П р и м е ч а н и е. Приведенные значения характеристик механических свойств соответствуют условиям статического нагружения (υ =1÷2,0·10^{-2} мм/с; ε_i =2…5·10^{-4} 1/с) и состоянию поставки полос и лент, из которых изготавливают образцы для механических испытаний.

Максимальное усилие вырубки (пробивки) $P_{\max}$ соответствует внедрению пуансона в заготовку на величину $h_{\text{м}}$ и началу ее разрушения (см. рис. 6.1,*а*,*в*).

Усилия проталкивания $P_{\text{пр}}$ и съема $P_{\text{сн}}$ затрачиваются на преодоление сил трения, возникающих на поверхностях контакта отделяемой и остающейся частей заготовки соответственно с матрицей и пуансоном. Учет этих сил необходим для более точного определения работы формоизменения, выбора буферных устройств, расчета прочности крепления пуансона. Требуемые для выполнения технологических операций и выбора прессового оборудования усилия рассчитываются по формулам (6.5)…(6.9).

Основными факторами, влияющими на параметры процессов вырубки и пробивки, являются:

- механические свойства материала исходной заготовки ($\sigma_{\text{в}}$, $S_{\text{к}}$, ψ, $\varepsilon_{\text{р}}$);
- толщина исходной заготовки S_0;
- зазоры между пуансоном и матрицей $2z$;
- форма и состояние режущих кромок;
- условия смазки и скорость процесса;
- величина перемычек между вырубаемыми контурами и краем полосы.

С повышением прочностных характеристик материала заготовки ($\sigma_{\text{в}}$, $S_{\text{к}}$) возрастают сопротивление срезу $\sigma_{\text{ср}}$ и максимальное усилие деформирования $P_{\max}$; с повышением показателей пластичности увеличивается относительная глубина внедрения пуансона в металл $h_{\text{м}}/S_0$.

С увеличением толщины исходной заготовки S_0 растет максимальное усилие вырубки, пробивки $P_{\max}$, уменьшается сопротивление срезу $\sigma_{\text{ср}}$.

В общем случае с увеличением зазора z сопротивление срезу $\sigma_{ср}$ и усилие вырубки, пробивки P_{max} при всех условиях деформирования немонотонно уменьшаются. При этом наиболее интенсивное уменьшение указанных параметров наблюдается в сравнительно небольшом диапазоне изменения зазора z и при относительно небольшом его значении (3…5 %) . При проектировании рабочего инструмента рекомендуется назначать оптимальные зазоры, обеспечивающие получение качественной поверхности среза при наименьшем сопротивлении срезу $\sigma_{ср}$ и наибольшей стойкости рабочего инструмента. Величину оптимального зазора задают интервалом значений ($2z_{max} - 2z_{min}$) (табл. 6.4,6.5).

Таблица 6.4

Оптимальные технологические зазоры (двусторонние), применяемые в общем машиностроении для различных металлических материалов, $\sigma_в$, кгс/мм^2

S_0 , мм	До 20		20- 40		40 - 60	
	$2z_{опт}$					
	% S_0	мм	% S_0	мм	% S_0	мм
0,6	4-6	0,02-0,04	6-8	0,04-0,05	8-10	0,05-0,06
0,8		0,03-0,05		0,05-0,06		0,06-0,08
1,0		0,04-0,06		0,06-0,08		0,08-0,10
1,2		0,05-0,07		0,07-0,10		0,10-0,12
1,5		0,06-0,09		0,09-0,12		0,12-0,15
1,8	5-7	0,09-0,13	7-9	0,13-0,16	9-11	0,16-0,20
2,0		0,10-0,14		0,14-0,18		0,18-0,22
2,5		0,13-0,18		0,18-0,22		0,22-0,28
3,0		0,15-0,21		0,21-0,27		0,27-0,33
3,5	7-11	0,24-0,35	9-12	0,32-0,42	11-14	0,38-0,49
4,0		0,28-0,40		0,36-0,48		0,44-0,56
4,5		0,32-0,45		0,40-0,54		0,49-0,63
5,0		0,35-0,50		0,45-0,60		0,55-0,70
6,0	10-13	0,60-0,78	12-15	0,72-0,90	14-17	0,84-1,02
7,0		0,70-0,91		0,80-1,05		0,98-1,19
8,0		0,80-1,04		0,96-1,26		1,12-1,36
9,0		0,90-1,17		1,08-1,35		1,26-1,53
10,0		1,00-1,30		1,20-1,50		1,40-1,70
11,0 12,0	13-16	1,43-1,76 1,56-1,92	15-18	1,65-1,98 1,80-2,16	17-20	1,87-2,20 2,04-2,40

Примечание. Указанные зазоры рекомендуются для получения заготовок и готовых деталей.

Наиболее высокое качество поверхности среза при изготовлении тонколистовых деталей обеспечивается при применении уменьшенных зазоров (2…5 %), что, однако, приводит к увеличению усилия и работы и снижению стойкости рабочего инструмента.

Форма режущих кромок матриц и пуансонов оказывает значительное влияние на стойкость штампа, качество штампуемых деталей, усилие и работу формоизменения.

Таблица 6.5

Технологические зазоры для материалов отрасли, принятые на производстве

Материал	Стандарт на материал	Стандарт на полосы	S_0, мм	2z, мм
Латунь Л69 Латунь Л70 Томпак 190	ГОСТ 15527-70	ГОСТ 931-90	2,54 8,40 0,60	0,10-0,25 0,25-0,60 0,02-0,06
Сталь 08 КП	ГОСТ 803-66	ГОСТ 8851-75	1,00; 1,37 1,37; 8,70	0,06-0,10 0,14-0,15 0,14-0,20 2,00-2,05
Сталь 11 КП				
Сталь Н 18				
Сталь 18ЮА		ГОСТ 15883-70		
Биметалл I (сталь 18 КП, томпак Л90)	ГОСТ 803-66 (сталь) ГОСТ 15527-70 (томпак)	ОСТ 3-6648-91	3,20	0,20-0,25
Биметалл 3 (сталь 11КП, томпак Л90)		ОСТ 3-6649-91	0,99	0,06-0,09

Примечание. Указанные зазоры рекомендуются для получения заготовок.

Применение матриц с коническим профилем рабочей части (рис. 6.11) способствует уменьшению сил трения на поверхности контакта заготовки и инструмента, износа рабочих поверхностей и повышает стойкость штампов.

Для матриц с коническим профилем угол α (рис. 6.11,*в,г*) рекомендуется выбирать в зависимости от толщины S_0 исходной заготовки:

S_0, мм,	$\alpha°$
от 0,1 до 0,5	10
0,5 1,0	15
1,0 2,0	20
2,0 4,0	30
4,0 6,0	45
свыше 6,0	1°

При вырубке на провал в матрице этого типа происходит увеличение зазора после каждой переточки, поэтому исходный технологический зазор z следует задавать несколько меньше оптимального $z_{опт}$, т.е.

$$z_{опт} \geq z \geq z_{опт} - h_м \operatorname{tg}\alpha .$$

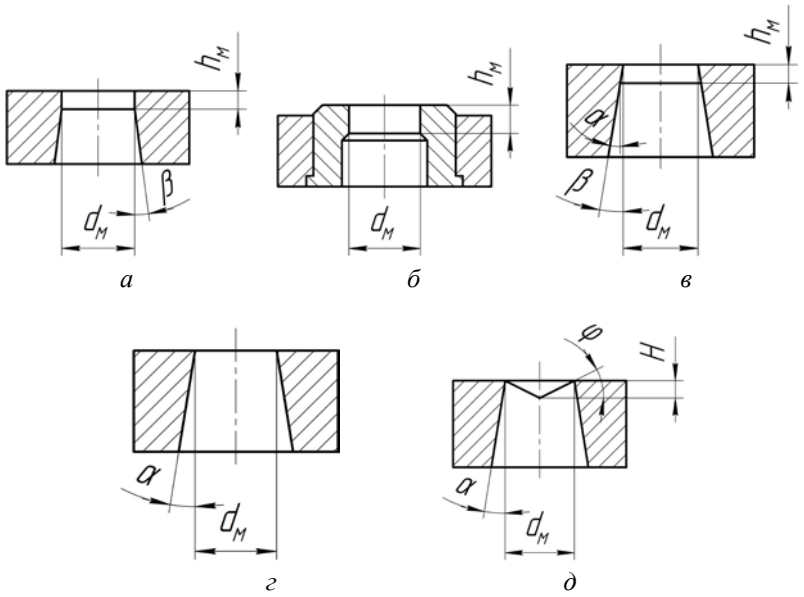


Рис. 6.11. Варианты конструкции матриц: *а, б* – с цилиндрическим пояском; *в* – с коническим пояском; *г* – без пояска; *д* – со скосом режущей кромки

Высота пояска для всех типов матриц назначается в пределах 3…12 мм. Для матрицы с коническим пояском высота пояска $h_м$ назначается в зависимости от толщины S_0 по следующим рекомендациям (размеры в мм):

S_0	$h_м$
До 0,5 ……..	3-5
От 0,5 до 1,0……	5-8
Свыше 1,0 …….	8-10

Резка металлов в штампах производится пуансонами с углом резания δ = 90°. Пуансоны малого диаметра выполняют с плоским торцом, а пуансоны большего диаметра – с выточкой на торце (рис. 6.12,*а,б*). Для снижения работы резки и уменьшения усилия съема штампуемого материала пуансоны выполняют с углом поднутрения β = 3÷5 (рис. 6.12, *в,г*). Применение пуансонов и матриц со скошенными режущими кромками (рис. 6.11,*д*, и 6.12,*г,з*) значительно снижает максимальное усилие деформирования P_{max}.

Для материалов толщиной до 3 мм принимается высота скоса $H = (1 \div 2)s_0$, угол скоса φ = 2÷5° , для материалов толщиной свыше 3 мм – $H = (2 \div 3)s_0$, φ = 5÷8°.

При пробивке отверстий малого относительного диаметра ($D_0/S_0 < 1{,}5$) в заготовке толщиной ($S_0 > 4{,}0$ мм) рекомендуется применять пробивные пуансоны с углом резания $\delta = 110°$ (рис. 6.12,*д*). Для пробивки отверстий с большими относительными диаметрами ($D_0/S_0 > 1{,}5$) в толстых материалах рекомендуются пуансоны с заостренным центром или вогнутой торцевой поверхностью (рис. 6.12,*ж*,*з*), так как при этом предотвращается сдвиг пуансона в начальный момент контакта с заготовкой. Шероховатость рабочей поверхности матрицы в пределах 2…4 мкм повышает стойкость штампа.

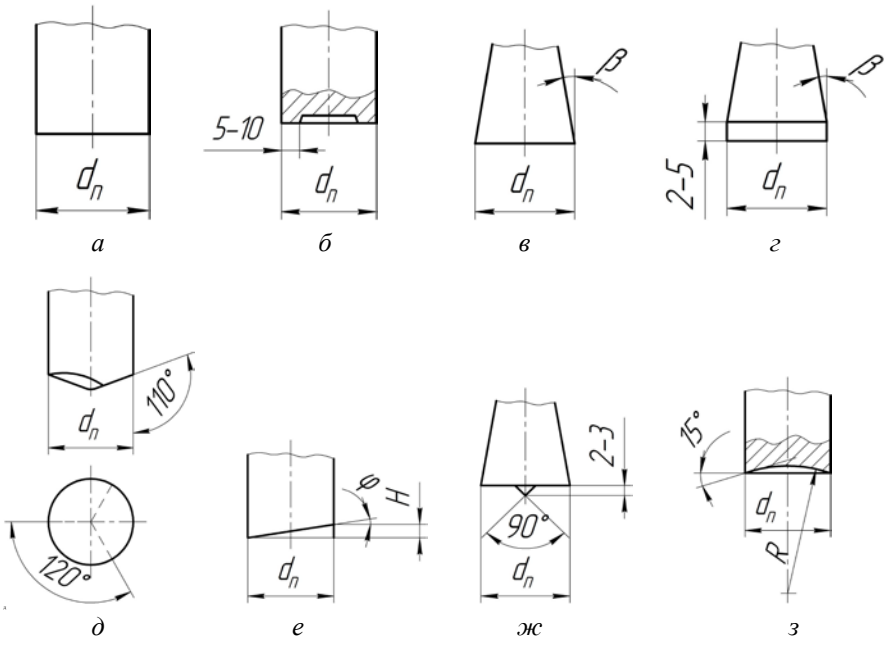


Рис. 6.12. Конструкция рабочей части пуансонов: *а* – с плоским торцем, без поднутрения; *б* – с выточкой, без поднутрения; *в*, *г* – с поднутрением; *д*, *е* – со скосом режущих кромок; *ж* – с заостренным центром; *з* – с вогнутым торцем

Применение смазок и смазочно-охлаждающих жидкостей повышает стойкость рабочего инструмента и качество штампуемых деталей.

Увеличение скорости процессов вырубки, пробивки путем повышения быстроходности прессового оборудования от 130 до 423 двойных ходов в минуту (при скорости деформирования до 0,28…0,3 м/с) не оказывает существенного влияния на качество штампуемых деталей, но незначительно уменьшает

сопротивление срезу, максимальные усилие $P_{\max}$ и работу формоизменения A. Дальнейшее повышение скорости деформирования до 25 м/с незначительно повышает качество штампуемых деталей, в частности, параметр $h_{\text{м}}/S_0$, значительно, в особенности для тонколистовых материалов, увеличивает максимальное усилие вырубки, пробивки (до 2,5 раза); увеличивает сопротивление срезу (табл. 6.6) и уменьшает работу формоизменения. Уменьшение работы формоизменения с ростом скорости процесса вызвано уменьшением пластически деформируемого объема металла и значительным повышением температуры в зоне очага пластической деформации. Повышение скорости процесса при непрерывной работе штампов требует применения повышенных в 1,5…2,0 раза оптимальных зазоров, исключающих заклинивание рабочего инструмента при его разогреве.

Таблица 6.6

Зависимость сопротивления срезу при вырубке (пробивке) от скорости процесса для биметалла 1

υ ,м/с	$\dot{\varepsilon}_i$, 1/с	$\sigma_{\text{ср}}$,кгс/мм^2
$1\cdot10^{-4}$	$7{,}7\cdot10^{-2}$	28,5
$1\cdot10^{1}$	$1{,}47\cdot10^{4}$	57,5
$2\cdot10^{1}$	$2{,}94\cdot10^{4}$	71,5

Примечание. υ – скорость деформирования; $\dot{\omega}_i$ – скорость деформации.

6.5. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента

Исполнительными размерами рабочего инструмента являются размеры в плане рабочей части матриц и пуансонов, в частности диаметры их рабочих поясков (см. рис. 6.11,6.12).

При расчете исполнительных размеров рабочего инструмента один из пары инструментов «пуансон–матрица», непосредственно влияющий на точность штампуемой детали, принимается за "основной". Размеры "основного" инструмента определяются по номинальным размерам вырубаемой детали или пробиваемого отверстия с учетом допускаемых отклонений на изготовление детали или отверстия, степени и направления износа и допусков на изготовление рабочего инструмента, а также возможных упругих деформаций инструмента и детали.

Размеры другого инструмента из пары рассчитываются по размерам "основного" с учетом заданных технологических зазоров и допусков на изготовление рабочего инструмента.

На операции вырубка "основным" инструментом является матрица, на операции пробивка – пуансон.

В общем случае исполнительные размеры рабочего инструмента рассчитываются по следующим формулам:

- при вырубке

$$A_{\text{м}} = (A_{\max} - П_{\text{изн}} - \delta_y)^{+T_{\text{м}}};$$
$$A_{\text{п}} = (A_{\text{м}} - 2z_{\min})_{-T_{\text{п}}}; \qquad (6.21)$$

- при пробивке

$$A_{\text{п}} = (A_{\min} + П_{\text{изн}} + \delta_y)_{-T_{\text{п}}};$$
$$A_{\text{м}} = (A_{\text{п}} + 2z_{\min})^{+T_{\text{м}}}, \qquad (6.22)$$

где $A_{\text{м}}$, $A_{\text{п}}$ – исполнительные размеры соответственно матрицы и пуансона; $A_{\min} = A + \Delta_1$ – минимальный размер штампуемой детали; $A_{\max} = A + \Delta_2$ – максимальный размер штампуемой детали; A – номинальный размер штампуемой детали; Δ_1, Δ_2 – соответственно нижнее и верхнее допускаемые отклонения на размер штампуемой детали; $П_{\text{изн}}$ – припуск на износ "основного" рабочего инструмента; δ_y – суммарная алгебраическая величина упругой деформации основного инструмента и упругой разгрузки отштампованной детали; $T_{\text{м}}$, $T_{\text{п}}$ – допуски на изготовление пуансона и матрицы соответственно.

Номинальные размеры и допускаемые отклонения назначаются по чертежу штампуемой детали.

Величина припуска на износ "основного" рабочего инструмента устанавливается в зависимости от величины принятых зазоров и допусков на изготовление рабочего инструмента:

$$П_{\text{изн}} = 2z_{\max} - 2z_{\min} - T_{\text{м}} - T_{\text{п}}. \qquad (6.23)$$

Величина упругой деформации δ_y учитывается при назначении размеров пробивных пуансонов при необходимости получения точных отверстий (7…9-й квалитеты точности). Ее можно приближенно вычислить по формуле (при $S_0 = 4 \div 5$, мм, $d \le 20$, мм)

$$\delta_y = 0{,}001K \cdot S_0 - K \cdot z^2 / S_0,$$

где K – коэффициент, зависящий от марки штампуемого материала и степени затупления пуансона (для латуни K = 1,3-1,5, для стали K = 1,5-1,7; меньшие значения коэффициента принимаются для нового, заточенного инструмента).

При изготовлении деталей невысокой точности величина δ_y не учитывается.

Размеры пуансона и матрицы при вырубке, пробивке ограничивают одновременно допусками $T_м$ и $T_п$ на изготовление только в том случае, если допускаемое отклонение оптимального зазора для заданных толщины и механических свойств материала заготовки (табл. 6.4, 6.5) по величине больше суммарного допуска на их изготовление, т.е.

$$\left(2z_{\max} - 2z_{\min}\right) \geq \left(T_м + T_п\right). \qquad (6.24)$$

Если указанное условие не выполняется, то допуск на изготовление проставляется только на "основной" инструмент (при вырубке – на матрицу, при пробивке – на пуансон), другой же инструмент пригоняется по "основному" с учетом заданного технологического зазора.

Класс точности изготовления рабочего инструмента назначается в зависимости от номинального размера инструмента и принятого зазора (табл. 6.7).

Допуски на изготовление пуансона и матрицы выбираются по единой системе допусков и посадок ЕСДП СЭВ (стандарта СТ СЭВ 144-75 и СТ СЭВ 145-75).

Т а б л и ц а 6.7

Классы точности изготовления матриц и пуансонов для вырубки (пробивки) круглых деталей (отверстий)

S_0 ,мм	Номинальные диаметры инструмента, мм									
	1-3	3-6	6-10	10-18	18-30	30-50	50-80	80-120	120-180	180-260
0,0005-0,0030	H6 или h5*									
0,0030-0,0200	H7 или h6*									
0,0200-0,0600	H7									
0,0600-0,1500										
0,1500-0,2000						h6**				
0,2000-0,3000				H9						
0,3000-0,6000										
0,6000-2,0000	Не применяется									
Свыше 2,0000						h9**				

П р и м е ч а н и е. 1.* Допуск проставляется только на одной из рабочих деталей.

2. ** Допуск проставляется на двух деталях: на матрице со знаком плюс, на пуансоне – со знаком минус.

3. H6, h5 и т.д. – посадки в системе ЕСДП СЭВ (стандарты СТ СЭВ 144-75, СТ СЭВ 145-75).

6.6. Расчет технологических усилий

Расчет максимальных усилий вырубки и пробивки инструментом с плоскими режущими кромками производится по формулам:

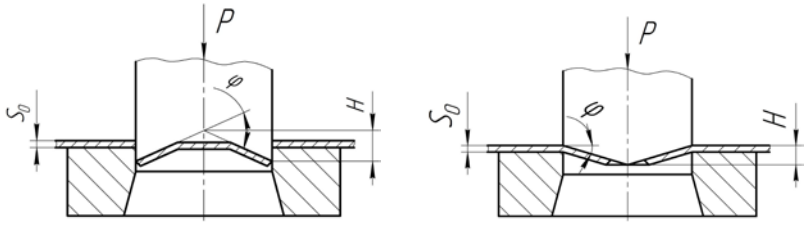
$P_{\max} = 1{,}3 S_0 L \sigma_{\text{ср}}$ – для деталей любой конфигурации;

$P_{\max} = 1{,}3 S_0 \pi d \sigma_{\text{ср}}$ – для плоских круглых деталей.

Максимальные усилия вырубки и пробивки инструментом со скошенными режущими кромками (рис. 6.13) при изготовлении деталей, отверстий круглой формы рассчитываются по формулам:

– при $H > S_0$

$$P_{\max} = 2{,}5 \cdot D_0 \cdot \sigma_{\text{ñð}} \cdot k \left(1 + 0{,}1\left(H / S_0 \cdot k\right)\right) \arcsin S_0 / H ; \qquad (6.25)$$



а *б*

Рис. 6.13. Технологические схемы вырубки (пробивки): *а* – пуансоном с наклоном режущих кромок внутрь; *б* – пуансоном с наклоном режущих кромок наружу

– при $H < S_0$ (рис. 6.14)

$$P_{\max} = 4{,}7 \frac{n_{\text{â}} \cdot D_0 \cdot S_0}{1{,}2 - 0{,}2 \cdot H / S_0} \sigma_{\text{ñð}} \left(1 + 0{,}1\left(H / S_0 \cdot k\right)\right), \qquad (6.26)$$

где $k = 1{,}25 \ldots 1{,}30$; $n_{\text{в}} = f\left(H / S_0 , h_{\text{м}} / S_0\right)$.

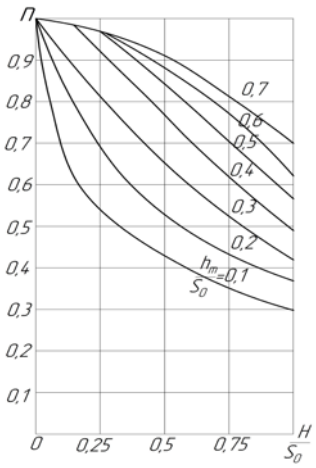


Рис. 6.14 .Зависимость коэффициента $n_{\text{в}}$ от механических свойств материала $h_{\text{м}} / S_0$ и относительной высоты скоса пуансона H / S_0

Более высокие значения коэффициента $n_в$ назначаются для меньших толщин, зазоров и при работе без смазки.

Усилие для снятия полосы (ленты) с пуансона определяется для одной позиции штампа по формуле

$$P_{сн} = K_{сн} \cdot P_{max},$$

где $K_{сн}$ определяется по табл. 6.8.

Таблица 6.8

Значения коэффициента $K_{сн}$ для определения усилия снятия заготовки с пуансона при вырубке, пробивке

Толщина заготовки S_0, мм	Тип штампа		
	Простого действия, однопозиционный	Простого действия, многопозиционный	Комбинированный, последовательного действия
До 1	0,02-0,06	0,10-0,12	0,06-0,08
1-5	0,06-0,08	0,12-0,15	0,10-0,12
Свыше 5	0,08-0,10	0,15-0,20	0,12-0,15

Примечание. Более высокие значения коэффициентов назначаются для заготовок с большей толщиной и при увеличении числа позиций в штампе.

6.7. Расчет рабочего инструмента на прочность

Расчет пуансонов на прочность по допускаемым нагрузкам на сжатие и продольный изгиб выполняется по формулам (6.10),(6.11),(6.14):

$\sigma_{сж} = P_{max} / F_{оп} \le [\sigma_{сж}]$ – без учета смещения оси пуансона относительно оси матрицы;

$\sigma_{пр} = \sigma_{сж} + \sigma_{и} \le [\sigma_{сж}]$ – с учетом смещения оси пуансона относительно оси матрицы на величину «l» (см. рис. 6.5,6.6),

$$P_{max} \le (1/K_y) P_{кр},$$

где $\sigma_{сж}$ – напряжение сжатия в опасном сечении рабочей части пуансона; $\sigma_{пр}$ – приведенное напряжение; $\sigma_{и}$ – напряжение от изгиба в месте крепления (сечение *а* – см. рис. 6.5, 6.6); $F_{оп}$ – площадь наименьшего сечения рабочей части пуансона; $[\sigma_{сж}]$ – допускаемое напряжение на сжатие материала пуансона с учетом вида термической обработки (табл. 6.9); $P_{кр}$ – критическая нагрузка; K_y – коэффициент запаса устойчивости (для закаленной стали принимается $K_y = 2 \div 3$).

Величина максимального технологического усилия P_{max} рассчитывается в соответствии с рекомендациями подразд. 6.6.

Таблица 6.9

Допускаемые напряжения для материалов, применяемых при изготовлении рабочего инструмента

Марка стали	$\sigma_в$, кгс/мм^2	Допускаемые напряжения, кгс/мм^2			Твердость *HRC*, кгс/мм^2
		на растяжение $[\sigma_р]$	на сжатие $[\sigma_{сж}]$	на изгиб $[\sigma_и]$	
Сталь 65Г	150	-	-	50-80	38-45
Сталь У7, У7А	-	-	55-80	36-50	52-57
Сталь У8,У8А, У10, У10А ХI2М ШХ15	270-275, 290-300 270-280, 270-280	25	100-160	30-50	58-62
Х12Ф1 9ХС ХВГ	270-280, 245-250 250-255	-	-	-	59-61 56-57 60-63
7ХГ2ВФМ	240-260	-	-	-	56-58

Примечания. 1. Временное сопротивление $\sigma_в$ определено по результатам испытания на сжатие.

2. При расчетах обычных конструкций рекомендуется применять меньшие значения допускаемых напряжений.

Напряжения от изгиба определяются по формуле

$$\sigma_и = M_и / W,$$

где $M_и = P \cdot l$ – изгибающий момент; W – момент сопротивления сечения (табл. 6.10).

Таблица 6.10

Расчетные формулы для определения поперечного сечения *F*, осевых моментов инерции *J*, моментов сопротивления *W* различных геометрических фигур

Вид сечения геометрической фигуры	Расчетные формулы		
	F	*J*	*W*
Круг диаметром «d»	$\frac{\pi d^2}{4} = 0{,}785 d^2$	$\frac{\pi d^4}{64} \approx 0{,}05 d^4$	$\frac{\pi d^3}{32} \approx 0{,}1 d^3$
Квадрат с размером стороны «a»	a^2	$a^4/12$	$a^3/6$
Прямоугольник с размерами сторон «a» и «b»	ab	$J_1 = \frac{a^2 b}{12};\ J_2 = \frac{ab^2}{12}$ *	$W_1 = \frac{ba^2}{6};\ W_2 = \frac{ab^2}{6}$ *
Правильный шестиугольник с размером стороны «a»	$5{,}6a^2$	$0{,}541a^4$	$W_1 = 0{,}625a^3;\ W_2 = 0{,}541a^3$
Круг диаметром D с круговым отверстием d	$\frac{\pi}{4}\left[D^2 - d^2\right]$	$\frac{\pi D^4}{64}\left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right]$	$\frac{\pi D^3}{32}\left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^3\right]$
Правильный многоугольник с *n* сторонами размера «a»	$\frac{1}{4} n a^2 \operatorname{ctg}\alpha$	$J_1 = \frac{F\left(6R_1^2 - a^2\right)}{24};$ $J_2 = \frac{F\left(12R_2^2 - a^2\right)}{48}$	-

Примечание. 1. *– *J* и *W* даны для двух осей;

2. $R_1 = a/2\sin\alpha$, $R_2 = a/2\operatorname{tg}\alpha$ – радиусы вписанной в правильный многоугольник и описанной окружностей;

3. α – угол между биссектрисой и перпендикуляром к грани многоугольника.

В общем случае критическое значение нагрузки может быть выражено формулой

$$P_{\text{кр}} = \eta(EJ/l^2),$$

где J – осевой момент инерции (см. табл. 6.10); l – длина незакрепленной части пуансона; E – модуль нормальной упругости (для инструментальной стали принимается $E = 2{,}1\cdot10^4 \div 2{,}2\cdot10^4$ кгс/мм^2).

Коэффициент η отражает влияние следующих факторов на критическую нагрузку:

- характера связей (линейные, угловые, абсолютно жесткие или упругие), наложенных на промежуточные и торцевые сечения стержня;
- характера нагружения пуансона внешними силами (сосредоточенные, распределенные нагрузки);
- характера изменения сечения стержня по его длине (постоянное, ступенчатое, непрерывно переменное).

Для случая жесткого закрепления пуансона в пуансонодержателе и нагружения в торец продольной силой P (см. рис. 6.5,*в*) принимается $\eta = 2{,}467$.

Для случая жесткого закрепления пуансона в пуансонодержателе с применением в качестве промежуточной опоры направляющей втулки или съемника (см. рис. 6.6) и нагружения в торец продольной силой значения коэффициента η определяются в зависимости от относительного расстояния промежуточной опоры от нагружаемого торца b/l:

b/l	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
η	2,467	2,883	3,414	4,105	5,020	6,260	7,990	10,390	13,590	17,240	20,190

Допускаемые из условия прочности на сжатие значения отношения размера пуансона в плане к толщине заготовки или пробиваемой перегородки определяются из следующих неравенств:

а) при отсутствии смещения оси пуансона относительно оси матрицы:

- для цилиндрических пуансонов

$$d_{\text{п}}/S_0 \geq 5{,}2\,\sigma_{\text{ср}}/[\sigma_{\text{сж}}];$$

- для пуансонов с квадратным поперечным сечением

$$a_{\text{п}}/S_0 \geq 5{,}2\,\sigma_{\text{ср}}/[\sigma_{\text{сж}}]; \qquad (6.27)$$

- для пуансонов с прямоугольным поперечным сечением

$$\frac{a_{\text{п}}}{S_0}\frac{1}{(1+a_{\text{п}}/b_{\text{п}})} \geq 2{,}6\frac{\sigma_{\text{ср}}}{[\sigma_{\text{сж}}]};$$

- для пуансонов с поперечным сечением в виде шестигранника

$$\frac{a_{\text{п}}}{S_0} \geq 1{,}39\frac{\sigma_{\text{ср}}}{[\sigma_{\text{сж}}]};$$

б) при смещении оси пуансона относительно оси матрицы на величину l=z:

- для цилиндрических пуансонов

$$\frac{d_{\text{п}}}{S_0} \geq 5{,}2\left(1+8\frac{z}{a_{\text{п}}}\right)\frac{\sigma_{\text{ср}}}{[\sigma_{\text{сж}}]};$$

- для пуансонов с квадратным поперечным сечением

$$\frac{a_{\text{п}}}{S_0} \geq 5{,}2\left(1+6\frac{z}{a_{\text{п}}}\right)\frac{\sigma_{\text{ср}}}{[\sigma_{\text{сж}}]};$$

- для пуансонов с прямоугольным поперечным сечением

$$\frac{a_{\text{п}}}{S_0}\frac{1}{(1+a_{\text{п}}/b_{\text{п}})} \geq 2{,}6\left(1+6\frac{z}{a_{\text{п}}}\right)\frac{\sigma_{\text{ср}}}{[\sigma_{\text{сж}}]}; \qquad (6.28)$$

- для пуансонов с шестигранным поперечным сечением

$$\frac{a_{\text{п}}}{S_0} \geq 1{,}39\left(1+10{,}35\frac{z}{a_{\text{п}}}\right)\frac{\sigma_{\text{ср}}}{[\sigma_{\text{сж}}]},$$

где $d_{\text{п}}$ – диаметр рабочей части цилиндрического пуансона; $a_{\text{п}}$ – длина стороны квадрата, шестигранника и наименьшей стороны прямоугольника; $b_{\text{п}}$ – длина большей стороны прямоугольника.

Допускаемая из условия прочности на продольный изгиб длина незакрепленной части пуансонов будет равна:

- для штампов без направляющей втулки или плиты

$$l \leq \sqrt{\frac{\pi^2 EJ}{4K_y P_{\max}}}; \qquad (6.29)$$

- для штампов с направляющей втулкой, плитой

$$l \leq \sqrt{\frac{\eta EJ}{K_y P_{\max}}}\ .$$

Допускаемое значение относительной длины незакрепленной части пуансона при $K_y = 3$ может быть определено из следующих формул:

- для цилиндрического пуансона без промежуточной опоры

$$\frac{l}{d_{\text{п}}} \leq 0{,}10\sqrt{\frac{d_{\text{п}}}{S_0}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{\text{ср}}}}; \qquad (6.30а)$$

• для цилиндрического пуансона с промежуточной опорой

$$\frac{l}{d_{\text{п}}} \le 0{,}11\sqrt{\eta}\sqrt{\frac{d_{\text{п}}}{S_0}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{\text{ср}}}}; \qquad (6.30\text{б})$$

• для пуансона с квадратным сечением без промежуточной опоры

$$\frac{l}{d_{\text{п}}} \le 0{,}13\sqrt{\frac{a_{\text{п}}}{S_0}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{\text{ср}}}}; \qquad (6.31\text{а})$$

• пуансона с квадратным сечением с промежуточной опорой

$$\frac{l}{a_{\text{п}}} \le 0{,}08\sqrt{\eta}\sqrt{\frac{a_{\text{п}}}{S_0}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{\text{ср}}}}; \qquad (6.31\text{б})$$

• для пуансона с прямоугольным сечением без промежуточной опоры

$$\frac{l}{a_{\text{п}}} \le \sqrt{\frac{a_{\text{п}}}{S_0\left(1+\frac{a_n}{b_n}\right)}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{\text{ср}}}}; \qquad (6.32\text{а})$$

• для пуансона с прямоугольным сечением при наличии промежуточной опоры

$$\frac{l}{a_{\text{п}}} \le 0{,}12\sqrt{\eta}\sqrt{\frac{a_{\text{п}}}{S_0\left(1+\frac{a_{\text{п}}}{b_{\text{п}}}\right)}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{\text{ср}}}}; \qquad (6.32\text{б})$$

• для пуансона шестигранного без промежуточной опоры

$$\frac{l}{a_{\text{п}}} \le 0{,}27\sqrt{\frac{a_{\text{п}}}{S_0}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{\text{ср}}}}; \qquad (6.33\text{а})$$

• для пуансона шестигранного с промежуточной опорой

$$\frac{l}{a_{\text{п}}} \le 0{,}17\sqrt{\eta}\sqrt{\frac{a_{\text{п}}}{S_0}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{\text{ср}}}}. \qquad (6.33\text{б})$$

Проверка прочности матриц производится по допускаемым напряжениям на изгиб и разрыв в окружном направлении, т.е.

$$\sigma_{\text{и}} \le [\sigma_{\text{и}}];\ \sigma_{\text{р}} \le [\sigma_{\text{р}}],$$

где $\sigma_{\text{и}}$, $\sigma_{\text{р}}$ – действующее напряжение изгиба и растяжения соответственно; $[\sigma_{\text{и}}]$, $[\sigma_{\text{р}}]$ – допускаемые напряжение на изгиб и разрыв соответственно (табл. 6.9).

Напряжения изгиба $\sigma_{\text{и}}$ вычисляются по следующим формулам:

• для круглой матрицы с диаметрами цилиндрического пояска $d_{\text{м}}$ и опорного кольца d_0 (см. рис. 6.7); (6.34а)

$$\sigma_{и} = \frac{2{,}5P_{\max}}{H_{м}{}^{2}}\left(1-\frac{2}{3}\frac{d_{м}}{d_{o}}\right); \qquad (6.34а)$$

- для прямоугольной матрицы с опорой на плиту с квадратным отверстием $a \times a$

$$\sigma_{и} = \frac{1{,}5P_{\max}}{H_{м}{}^{2}}; \qquad (6.34б)$$

- для прямоугольной матрицы с опорой на плиту с прямоугольным отверстием размерами $a \times b$

$$\sigma_{и} = \frac{3P_{\max}}{H_{м}^{2}}\left(\frac{b/a}{1+b^{2}/a^{2}}\right), \qquad (6.34в)$$

где $H_{м}$ – толщина матрицы.

Допускаемые значения толщин матрицы рассчитываются из условия прочности на изгиб по формулам:

- для круглой матрицы

$$H_{м} \geq \sqrt{\frac{2{,}5P_{\max}}{[\sigma_{и}]}\left(1-\frac{2d_{м}}{3d_{o}}\right)}; \qquad (6.35а)$$

- для прямоугольной матрицы с опорой на плиту с квадратным отверстием

$$H_{м} \geq \sqrt{\frac{1{,}5P_{\max}}{[\sigma_{и}]}}; \qquad (6.35б)$$

- для прямоугольной матрицы с опорой на плиту с прямоугольным отверстием

$$H_{м} \geq \sqrt{\frac{3P_{\max}}{[\sigma_{и}]}\left(\frac{b/a}{1+b^{2}/a^{2}}\right)}. \qquad (6.35в)$$

Растягивающие напряжения рассчитываются по формуле

$$\sigma_{р} = 0{,}4\left(P_{\max}/F_{м}\right). \qquad (6.36)$$

6.8. Пример технологических расчетов процесса вырубки заготовок стальной гильзы клб. 14,5 мм

6.8.1. Исходные данные

Материал заготовки – сталь углеродистая высококачественная горячекатаная 18ЮА в виде полосы с $S_{0} = 8{,}7_{-0{,}4}$ мм (ГОСТ 15883 - 70).

Механические свойства материала в состоянии поставки (см. табл. 6.3)

$$\sigma_{в} = 46, \text{ кгс}/\text{мм}^2 ; \ \delta = 38 \div 39\% ;$$

$$\sigma_{0,2} = 32, \text{ кгс}/\text{мм}^2 ; \ \psi = 70 \div 71\% ;$$

$$S_{к} = 95 \div 96, \text{ кгс}/\text{мм}^2 ; \ h_{м}/S_0 = 38\% .$$

Размеры детали (заготовки) после вырубки:

$$D_0 = 49{,}04_{-0{,}36} \text{ мм} ; \ S_0 = 8{,}7_{-0{,}4} \text{ мм} .$$

Допускаемые отклонения по диаметру

$$\Delta_1 = 0{,}36 ; \ \Delta_2 = 0 .$$

Точность штампуемой детали по диаметру соответствует 14 квалитету точности по ЕСДП СЭВ.

Конструкция рабочего инструмента. Матрица с цилиндрическим пояском и плоскими режущими кромками (см. рис. 6.11,*а*), пуансон с плоскими режущими кромками (см. рис. 6.12,*а*).

Условия вырубки. Вырубка осуществляется из полосы с применением двухрядного шахматного раскроя, смазки, на кривошипных прессах с нормальными скоростями и нормальными (оптимальными) зазорами при удалении детали на провал.

6.8.2. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента

Расчет выполняется в соответствии с методикой, изложенной в подразд. 6.5.

В качестве "основного" инструмента принимается матрица. Ввиду невысокой точности штампуемой детали (14-й квалитет) при расчете размеров матрицы упругие деформации инструмента и заготовки не учитываются, т.е. принимается $\delta_{ó} = 0$.

Исполнительные размеры рабочего инструмента рассчитываются по формулам:

$$A_{м} = (A_{\max} - П_{изн})^{+T_{м}} ;$$

$$A_{п} = (A_{м} - 2z_{\min})_{-T_{п}} ;$$

$$A_{\max} = A ;$$

$$П_{изн} = 2z_{\max} - 2z_{\min} - T_{м} - T_{п} .$$

Для расчета исполнительных размеров инструмента принимается:

$A = D_0 = 49{,}04$ мм ; $2z_{\min} = 1{,}26$ мм ; $2z_{\max} = 1{,}26$ мм (см. табл. 6.4);

$T_{м} = 0{,}062$ мм ; $T_{п} = 0{,}062$ мм (см. табл. 6.7, квалитет 9 СТ СЭВ 145-75).

Проверяется условие (6.24):

$$(2z_{\max} - 2z_{\min}) \geq (T_{\text{м}} + T_{\text{п}});$$
$$(1{,}53 - 1{,}26) \geq (0{,}062 + 0{,}062);$$
$$0{,}270 \geq 0{,}124.$$

Условие выполняется, поэтому допуск на изготовление инструмента назначается как на размер пуансона, так и на размер матрицы.

Подставляя численные значения указанных параметров в приведенные расчетные формулы, получим:

$$П_{\text{изн}} = 1{,}53 - 1{,}26 - 0{,}026 - 0{,}026 = 0{,}15 \text{ мм};$$
$$A_{\text{м}} = (49{,}04 - 0{,}15)^{+0{,}062} = 48{,}89^{+0{,}062} \text{ мм};$$
$$A_{\text{п}} = (49{,}04 - 1{,}26)_{-0{,}026} = 47{,}63_{-0{,}026} \text{ мм}.$$

С учетом полученных данных составляются эскизы рабочей части инструмента (см. рис. 6.15). Значения высоты цилиндрического пояска матрицы $h_{\text{м}}$ и угла конусности выходной части матрицы β определяются в соответствии с данными выше рекомендациями: $h_{\text{м}} = 12$ мм; $\beta = 3°$.

Конструктивные размеры инструмента определяются с учетом конструкции штампа.

6.8.3. Расчет технологических усилий

Расчет технологических усилий производится в соответствии с рекомендациями подразд. 6.6.

Максимальное усилие вырубки одной детали рассчитывается по формуле

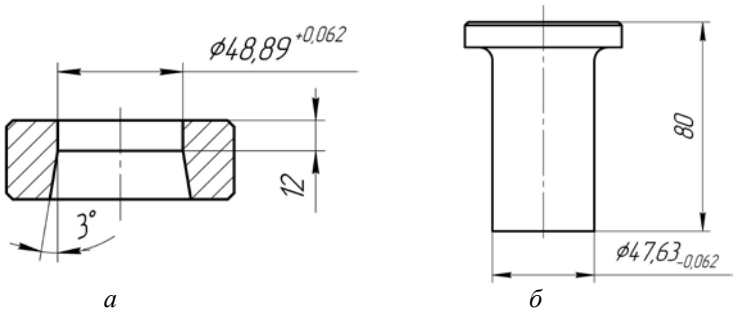
$$P_{\max} = 1{,}3 S_0 \pi d \sigma_{\text{ср}}.$$

Сопротивление срезу принимается равным:

$$\sigma_{\text{ñð}} = u\sigma_{\text{â}} = 0{,}8 \cdot 46 = 360{,}6 \text{ ÌÏà} \quad (36{,}8 \text{ êãñ/ìì}^2).$$

Максимальное технологическое усилие

$$P_{\max} = 1{,}3 \cdot 3{,}14 \cdot 49{,}04 \cdot 37{,}0 \cdot 8{,}7 = 65{,}3 \text{ тс } (0{,}64 \text{ МН}).$$



а *б*

Рис. 6.15. Эскизы рабочего инструмента: *а* – матрица; *б* – пуансон

Максимальное усилие, передаваемое штампом,

$$P_{\Sigma} = \sum_{1}^{m} P_i = 4P_{\max} = 261{,}2 \text{ тс } (2{,}56 \text{ МН}).$$

Усилие проталкивания деталей через матрицу

$$P_{\text{пр}} = k_{\text{пр}} P_{\Sigma} \frac{h_{\text{м}}}{S_0} = 0{,}07 \cdot 261{,}2 \cdot \frac{12}{8{,}7} = 25{,}2 \text{ тс } (0{,}25 \text{ МН}).$$

Усилие снятия полосы с пуансона (см. табл. 6.8)

$$P_{\text{ср}} = k_{\text{сн}} P_{\Sigma} = 0{,}20 \cdot 261{,}2 = 52{,}24 \text{ тс } (0{,}51 \text{ МН}).$$

Потребное для выполнения операции усилие в штампе простого действия, четырехпозиционном четырехрядном раскрое

$$P_{\text{оп}} = P_{\Sigma} + P_{\text{пр}} + P_{\text{сн}} = 261{,}2 + 25{,}2 + 52{,}2 = 338{,}8 \text{ тс } (3{,}32 \text{ МН}).$$

6.8.4. Расчет рабочего инструмента на прочность

Принимаем для изготовления пуансона – сталь У10А, матрицы – сталь У10А. Штамп с направляющей плитой.

Проверка прочности пуансона на сжатие. Принимаем во внимание наиболее жесткие условия нагружения пуансона при наличии смещения его оси $e \approx z$.

Тогда проверяется условие

$$\sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{и}} \le [\sigma_{\text{и}}],$$

где $\sigma_{\text{сж}} = P_{\max} / F_{\text{оп}}$; $\sigma_{\text{и}} = P_{\max} / W = P_{\max} / 0{,}1d^3$.

Подставляя в расчетные формулы значения $P_{\max}$, $F_{\text{оп}}$, W (см. табл. 6.10), $[\sigma_{\text{сж}}]$ (см. табл. 6.9), получим:

$$F_{\text{оп}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{п}}^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 47{,}63^2}{4} = 1770{,}4 \text{ мм}^2;$$

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{65300}{1770{,}4} = 36{,}88 \text{ кгс/мм}^2 \text{ (361,4 МПА)};$$

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{65300}{0{,}1 \cdot 47{,}63^3} = 6{,}10 \text{ кгс/мм}^2 \text{ (59,8 МПА)};$$

$$\sigma_{\text{пр}} = 36{,}88 + 6{,}10 = 42{,}98 \text{ кгс/мм}^2 \text{ (421,2 МПА)};$$

$$42{,}98 < 100 \div 160 \text{ ; } (421 < 980 \div 1568).$$

Условие прочности на сжатие выполняется.

В качестве условия прочности можно рассматривать также формулы для определения допустимого значения относительного диаметра пуансона $d_{\text{п}}/S_0$:

$$d_{\text{п}}/S_0 \geq 5{,}2\cdot\left(1+8\,z/d_{\text{п}}\right)\cdot\sigma_{\text{ср}}/[\sigma_{\text{ср}}];$$

$$d_{\text{п}}/S_0 \geq 5{,}2\cdot\left(1+8\cdot 1{,}26/47{,}6\right)\cdot 37{,}0/[160];$$

$$5{,}5 \geq 1{,}25.$$

Это условие прочности также выполняется.

Проверка прочности пуансона на продольный изгиб. Условие прочности записывается в следующем виде:

$$P_{\max} = \left(1/K_{\text{у}}\right)P_{\text{êð}},$$

где $P_{\text{кр}} = \eta\left(EJ/l^2\right)$;

$J = \pi d^4/64 = 3{,}14\cdot 47{,}63^4/64 = 25\cdot 10^4$ мм^4;

$K_{\text{у}} = 3$;

$E = 2{,}1\cdot 10^4$ кгс/мм^2 (см. табл. 6.10) $l = 43$ мм (назначается по справочным данным и из конструктивных соображений); $l/d_{\text{ï}} = 43/47{,}63 = 0{,}9$; $\eta = f\cdot b/l$; $b = S_0 + 1/2\cdot l_{\text{вт}} = 8{,}7 + 1{,}75 = 26{,}2$ мм; $l_{\text{вт}} = 35$ мм – высота направляющий втулки; $b = 0{,}6$; $\eta = 7{,}99$.

Подставляя численные значения перечисленных параметров в условие устойчивости, получим

$$65{,}3\cdot 10^3 < \frac{1}{3}\cdot 7{,}99\frac{2{,}1\cdot 10^4\cdot 25\cdot 10^4}{43^2};$$

$$65{,}3\cdot 10^3 < 75{,}6\cdot 10^5.$$

Условие устойчивости выполняется.

Проверка пуансона на устойчивость может быть выполнена по условию $\frac{l}{d_{\text{п}}} \leq 0{,}11\sqrt{\eta}\sqrt{\frac{d_{\text{п}}}{S_0}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{\text{ср}}}}$ – для случая нагружения жестко закрепленного пуансона продольной силой при наличии промежуточной опоры (см. рис. 6.6,*б*):

$$\frac{43}{47{,}63} \leq 0{,}11\sqrt{7{,}99}\sqrt{\frac{47{,}63}{8{,}7}}\sqrt{\frac{2{,}1\cdot 10^4}{37{,}0}};$$

$$0{,}90 \leq 17{,}2.$$

Условие прочности выполняется.

Проверка матриц на прочность по допускаемым напряжениям на изгиб. Принята кольцевая матрица с круглым отверстием, установленная в четырехпозиционный матрицедержатель.

Размеры матрицы:

$$d_{\text{м}} = 48{,}89 \text{ мм};\ d_0 = 55 \text{ мм};\ H_{\text{м}} = 28 \text{ мм};\ D = 82 \text{ мм}.$$

Условия прочности записываются в следующем виде:

$$\frac{2{,}5P_{\max}}{H_{\text{м}}^{\,2}}\left(1-\frac{2}{3}\frac{d_{\text{м}}}{d_o}\right) \le [\sigma_{\text{и}}];\ H_{\text{м}} \ge \sqrt{\frac{2{,}5P_{\max}}{[\sigma_{\text{и}}]}\left(1-\frac{2d_{\text{м}}}{3d_o}\right)}.$$

Подставляя численные значения параметров в приведенные условия, получим

$$\sqrt{\frac{2{,}5\cdot 65300}{70}\left(1-\frac{2\cdot 48{,}89}{3\cdot 55}\right)} = 31;\ 28 < 31.$$

Условие прочности не выполняется.

Корректируем высоту матрицы, принимаем $H_{\text{м}} = 32$ мм.

Проверка матриц на разрыв. Условие прочности: $\sigma_{\text{р}} \le [\sigma_{\text{р}}]$.

Для рассматриваемого частного случая запишем

$$0{,}4\frac{P_{\max}}{H_{\text{м}}(D-d_{\text{м}})} \le [\sigma_{\text{р}}]\ .$$

Подставляя значения $P_{\max}$, $H_{\text{ì}}$, D, $d_{\text{ì}}$ и $[\sigma_{\text{р}}]$ в формулу, получаем

$$0{,}4\frac{65300}{32(82-48{,}9)} \le 24{,}5.$$

Допускаемое напряжение согласно табл. 6.9

$$[\sigma_{\text{р}}] = 25 \text{ кгс}/\text{мм}^2\ .$$

Условие прочности выполняется, т.е.

$$\sigma_{\text{р}} = 24{,}5 \text{ кгс}/\text{мм}^2 \le [\sigma_{\text{р}}] = 25 \text{ кгс}/\text{мм}^2\ .$$

6.8.5. Расчет коэффициента использования металла (КИМ)

Для приближенной оценки КИМ при раскрое полосы принимаем:

а) вид раскроя четырехрядный, шахматный ($n = 4$);

б) размеры вырубаемой заготовки $D_0 = 49$ м*м*; $S_0 = 8{,}7$ мм; $S_0/D_0 = 0{,}18$;

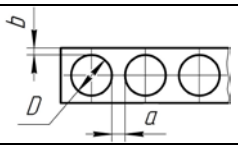
в) размеры перемычек: $a/S_0 = b/S_0 = 1{,}0$.

Расчет КИМ выполняется по формуле (6.18 в) $\eta = 60\%$.

Более точный расчет предполагает выбор величин перемычек по справочным рекомендациям (табл. 6.11), а также учет концевых отходов полосы (ленты).

Таблица 6.11

Минимальные размеры перемычек при однорядной вырубке металла

S, мм	$\sigma_в$, кгс/мм^2								
		При D, мм							
		До 50		50-100		100-200		Свыше 200	
		a	b	a	b	a	b	a	b
До 0,2	≤25	1,5	2,0	1,7	2,2	2,0	2,5	2,2	2,8
	>25	1,0	1,3	1,2	1,5	1,5	1,7	1,8	2,0
0,2-0,5	≤25	1,3	1,8	1,5	2,0	1,7	2,2	2,0	2,5
	>25	0,8	1.2	1,0	1,5	1,2	1,7	1,5	2,0
0,5-1,0	≤25	1,0	1,5	1,2	1,7	1,5	2,0	1,8	2,3
	>25	0,7	1,1	1,0	1,3	1,2	1,5	1,4	1,8
1,0-1,5	≤25	1,3	1,8	1,5	2,0	1,7	2,2	2,0	2,5
	>25	1,0	1,5	1,2	1,7	1	2,0	1,8	2,3
1,5-2,0	Для всех штампуемых металлов		2,0	1,7	2,2	2,0	2,5	2,2	2,8
2,0-2,5			2,3	2,0	2,5	2,3	2,8	2,5	3,0
2,5-3,0			2,5	2,2	2,7	2,5	3,0	2,8	3,3
3,0-4,0			3,0	2,7	3,2	3,0	3,5	3,2	3,8
4,0-5,0			3,5	3,2	3,7	3,5	4,0	3,7	4,3
5,0-6,0			4,0	3,7	4,3	4,0	4,5	4,2	4,8
6,0-7,0			4,5	4,2	4,8	4,5	5,0	4,8	5,3
7,0-8,0			5,0	4,7	5,3	5,0	5,5	5,3	5,8
8,0-9,0			5,5	5,3	5,8	5,5	6,0	5,8	6,3
9,0-10,0			6,0	5,7	6,3	6,0	6,5	6,3	6,8

П р и м е ч а н и е. При многорядной штамповке ширина перемычек может быть в 4-5 раз меньше указанной в таблице.

Библиографический список

1. *Агеев Н.П.*, Данилин Г.А., Огородников В.П. Вытяжка в штампах полых тонкостенных деталей машино- и приборостроения. В двух частях. Ч. 1. Механические основы процесса вытяжки. Тверь: Изд-во ГЕРС, 1997. 336 с.

2. *Аверкиев Ю.А.*, Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки: учебник. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.

3. *Ковка* и штамповка: справочник. В четырех томах. Т. 4. Листовая штамповка / Под ред. А.Д. Матвеева. М.: Машиностроение, 1985–1987. 544 с.

4. *Романовский В.П.* Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.

7. ВЫТЯЖКА (БЕЗ УТОНЕНИЯ СТЕНКИ ЗАГОТОВКИ)

Согласно классификации процессов штамповки (см. разд. 5) известны и широко применяются в промышленности, в том числе в патронном производстве, условно простые и комбинированные процессы вытяжки. К простым процессам относятся вытяжка без утонения и вытяжка с утонением. Состав комбинированных процессов достаточно широк и определяется возможностью сочетания с другими процессами листовой и объемной штамповки. В качестве примера на рис. 7.1 дана классификация простых и некоторых комбинированных процессов, организуемых на основе вытяжки без утонения или с утонением.

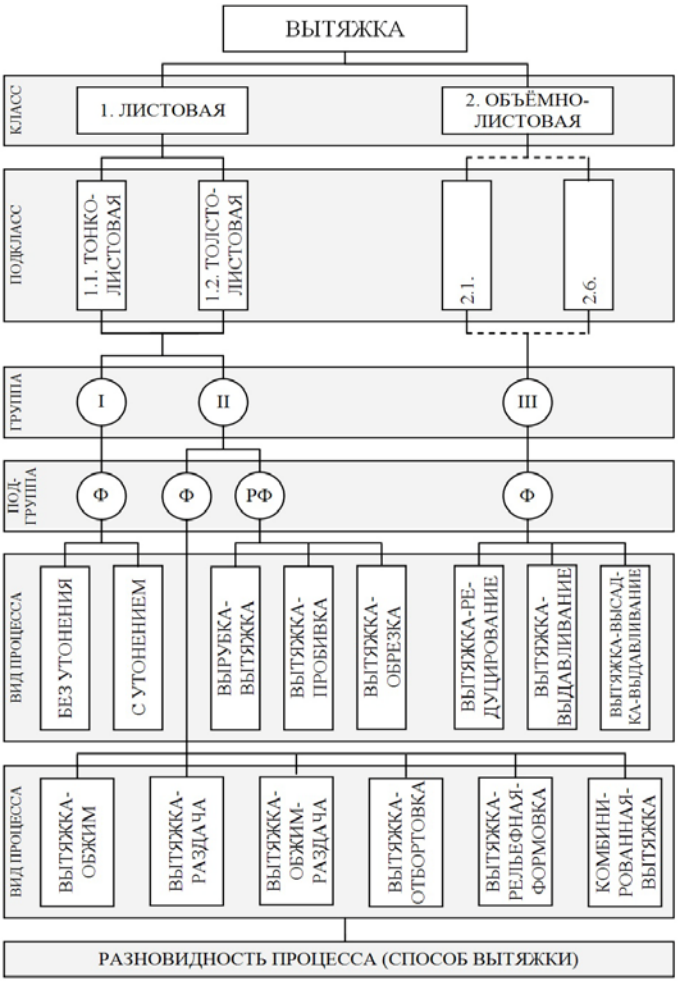


Рис. 7.1. Классификация процессов вытяжки

7.1. Способы вытяжки

Подробная классификация и характеристика способов вытяжки без утонения по выделенным в разд. 5 признакам дана в работе [1]. Применяемые в патронном производстве способы характеризуются следующими признаками. По форме исходной заготовки, поступающей на вытяжку: из полосы, ленты, штучной плоской круглой, квадратной, шестигранной, прямоугольной формы; из полой заготовки, полученной на предварительной вытяжке. По форме штампуемой детали применяют способы вытяжки цилиндрических, конических, с криволинейной образующей осесимметричных деталей без фланца и с фланцем (заготовки пульных оболочек, пиростаканы, трубки, наконечники и т.п.), а также коробчатых деталей (для укупорки патронов). По типу технологической среды применяют только традиционные способы вытяжки жестким инструментом, выполненным из инструментальных сталей (углеродистых и легированных).

По схеме приложения дополнительных сил в основном используют способы вытяжки без прижима.

По виду движения рабочего инструмента находит основное применение вытяжка в штампах на прессах и в инструментальных блоках АРЛ и РКЛ при поступательном движении инструмента, по температурно-скоростным условиям – холодная штамповка («статическая» и скоростная), по контактным условиям соответствующая граничному трению.

7.2. Технологические особенности процесса вытяжки цилиндрических деталей

7.2.1. Вытяжка без прижима из плоской осесимметричной заготовки (кружка)

Рассматривается традиционный способ вытяжки в штампе с помощью матрицы и пуансона с закругленными рабочими (вытяжными) кромками, радиусы которых в несколько раз больше толщины заготовки. Односторонний зазор между пуансоном и стенкой матрицы z больше толщины исходной заготовки S_0. При вытяжке пуансон давит на среднюю часть плоской заготовки толщиной S_0 и диаметром D_0 и втягивает ее в матрицу, при этом периметр заготовки уменьшается, а высота увеличивается и из плоской заготовки постепенно формируется деталь пространственной формы. К основным технологическим особенностям этого процесса относятся:

1) применение исходной плоской осесимметричной заготовки (кружка);

2) формообразование полой цилиндрической детали с толщиной стенки и дна приближенно равной толщине исходной заготовки ($S = S_0$);

3) применение рабочего инструмента (матрицы и пуансона) с вытяжными кромками, радиусы которых в несколько раз превышают толщину исходной заготовки ($r_м / S_0 >> 1{,}0$; $r_п / S_0 >> 1{,}0$);

4) нестационарность процесса;

5) локальный характер пластической деформации;

6) преобладание свободных поверхностей над контактными в зоне очага пластической деформации;

7) плоская схема напряженного состояния заготовки по ее объему.

Понятие нестационарности процесса вытяжки предполагает непрерывное изменение во времени, от начала и до конца, формы и размеров деформируемой заготовки, напряжений, деформаций и усилий.

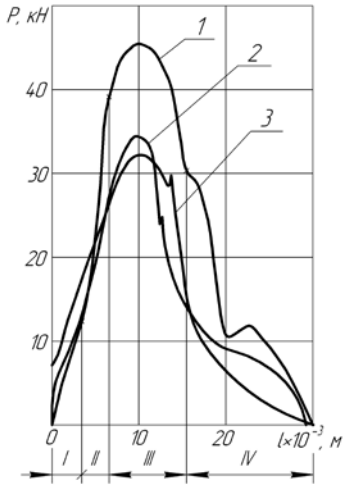


Рис. 7.2. Машинная диаграмма «усилие–путь инструмента» $P-h$ при вытяжке круглых (*1*), шестигранных (*2*) и квадратных (*3*) заготовок (материал биметалл 1; $S_0 = 2{,}87$ мм ; $d_м = 22{,}2$ мм)

Иллюстрацией этой особенности процесса служит вид машинной диаграммы «усилие–путь инструмента» $P-h$ (рис. 7.2), характер изменения формы, размеров заготовок и числовых значений параметров напряженного и деформированного состояния заготовки (рис. 7.3).

При этом можно выделить четыре характерных стадий процесса (рис. 7.2, кривая *1*): *1* – упругопластическое деформирование плоской заготовки с ее прогибом; *2* – пластическое деформирование в зоне кромки пуансона радиусом $r_п$; *3* – пластический изгиб с растяжением заготовки на участке ее контакта с вытяжной кромкой матрицы радиусом $r_м$; *4* – протягивание краевой части заготовки через цилиндрический поясок матрицы.

Локальный характер пластической деформации проявляется в последовательном формировании ОПД на различных участках заготовки ограниченных размеров. На первых двух стадиях процесса (рис. 7.2. и 7.3,*а*,*б*) ввиду пластического изгиба формируется первый локальный очаг пластической деформации (ОПД-1) на участке контакта заготовки с вытяжной кромкой радиусом $r_п$ пуансона. Силы, действующие со стороны пуансона и матрицы, смещены в радиальном направлении относительно друг друга и поэтому создают положительные изгибающие моменты в меридиональном (M_ρ) и окружном (тангенциальном) M_θ направлениях. Соответственно в очаге деформации в стенках заготовки появляются меридиональные (σ_ρ) и тангенциальные (σ_θ) растяги-

вающие, положительные, напряжения $(\sigma_\rho > 0, \sigma_\theta > 0)$, тогда как напряжения, направленные по нормали к поверхности, близки $(\sigma_n = 0)$. Последнее объясняется отсутствием внешних сил, приложенных к наружной «свободной» поверхности. Схему напряженного состояния этого вида принято называть в теории обработки металлов давлением плоской, одноименной (главные напряжения одного знака).

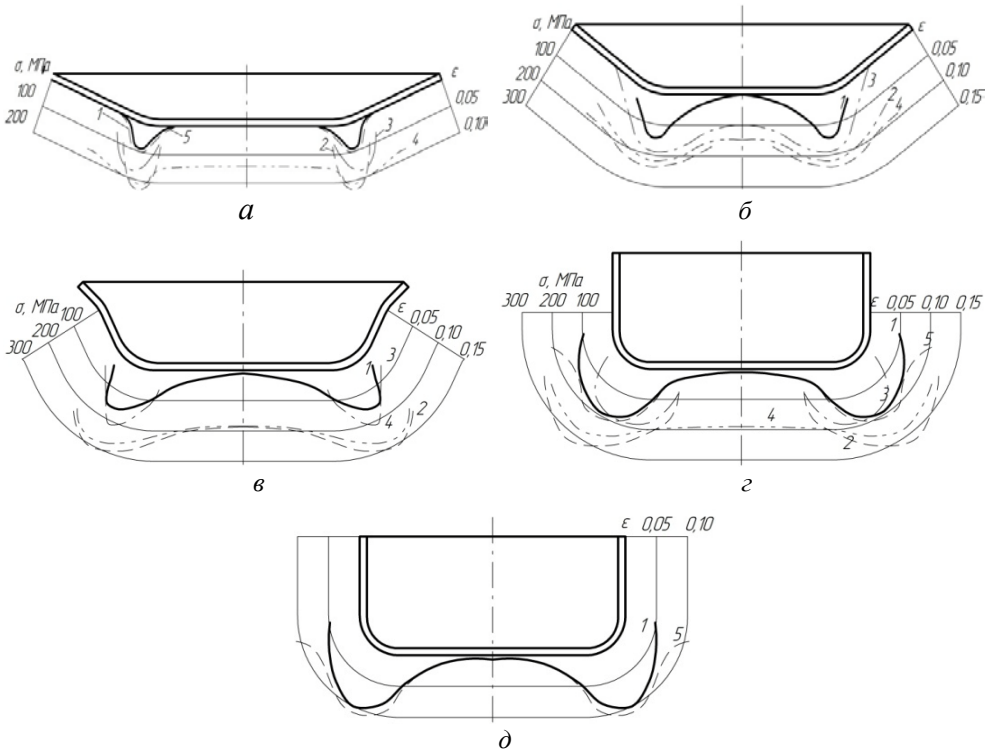


Рис. 7.3. Изменение формы заготовки и параметров напряженно-деформированного состояния вдоль ее образующей на различных стадиях процесса вытяжки, при различной относительной глубине вытяжки H_i/d_i ($r_п = 5$ мм, $r_і/d_і = 0{,}25$): *а* – 0,05; *б* – 0,12; *в* – 0,24; *г* – 0,58; *д* – 0,62; кривая *1* – ε_n; кривая *2* – σ_ρ; кривая *3* – σ_θ; кривая *4* – σ_i; кривая *5* – ε_i

Деформированное состояние заготовки характеризуется утонением (компонент деформации $\varepsilon_n < 0$) при одновременном удлинении криволинейного участка заготовки, контактирующем с пуансоном, в меридиональном (компонент деформации $\varepsilon_\rho > 0$) и тангенциальном (компонент деформации $\varepsilon_\theta > 0$) направлениях. Этот вид деформированного состояния в теории обработки металлов давлением относят к сжатию, вызванному двусторонним растяжением.

На третьей стадии процесса в краевой части заготовки формируется второй, основной очаг пластической деформации (ОПД-2) (рис. 7.3,*в*, 7.4). В отличие от ОПД-1 схема напряженного состояния будет разноименной, действуют напряжения разного знака, меридиональные растягивающие $(\sigma_\rho > 0)$, тангенциальные сжимающие ($\sigma_\theta < 0$), так как поперечные размеры заготовки уменьшаются, а $\sigma_n = 0$. Деформированное состояние заготовки в ОПД-2 также отличается. В зоне кромки при $\rho = R$ стенка утолщается ($\varepsilon_n > 0$) за счет уменьшения поперечных размеров ($\varepsilon_\theta < 0$) при одновременном удлинении образующей ($\varepsilon_\rho > 0$).

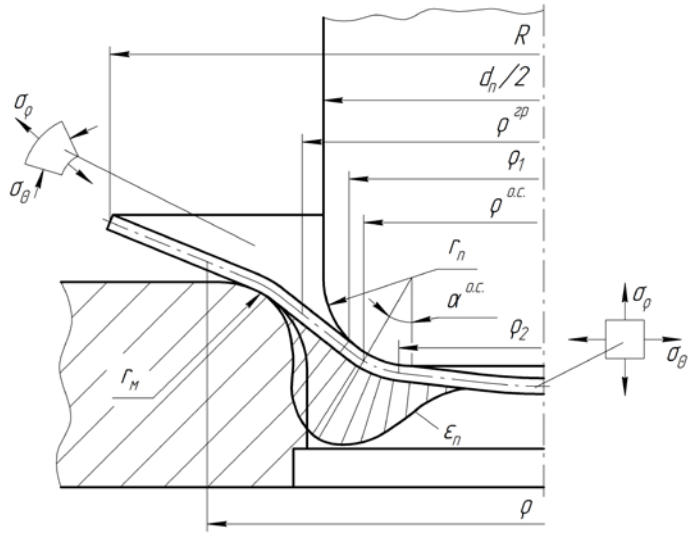


Рис. 7.4. Схема формообразования заготовки на промежуточной, третьей стадии процесса вытяжки

Такой вид деформированного состояния соответствует простому сжатию ($\varepsilon_\rho = \varepsilon_n = -1/2 \cdot \varepsilon_\theta$).

По мере перемещения к вытяжной кромке матрицы напряженное и деформированное состояние заготовки изменяется и на границе с ОПД-1 ($\rho = \rho^{гр}$) (рис. 7.4) $\sigma_\theta^{гр} = 0$, $\sigma_\rho^{гр} > 0$, $\sigma_n^{гр} = 0$; $\varepsilon_\rho^{гр} > 0$; $\varepsilon_n^{гр} < 0$; $\varepsilon_\theta^{гр} \cong 0$, что соответствует по схеме напряженного состоянию растяжению, а по виду деформированного состояния – сдвигу (характеристика вида $\nu_\varepsilon^{гр} = 0$). На этой стадии процесса формируется цилиндрическая стенка заготовки. При оптимальных условиях вытяжки цилиндрическая стенка, криволинейный участок заготовки, прилегающий к вытяжной кромке пуансона радиусом $r_п$ и дно заготовки

пластически не деформируются, несмотря на то, что на криволинейном участке при $\rho = \rho^{oc}$ (рис. 7.4) действуют в меридиональном направлении максимальные растягивающие напряжения $\sigma_{\rho\,max}$.

Значения радиусов граничного $\rho^{гр}$ и «опасного» ρ^{oc} сечений могут быть определены по следующим приближенным формулам:

$$\rho^{гр} = 0{,}37R; \tag{7.1}$$

$$\rho^{oc} = d_{п} \cdot \left(0{,}49 + 0{,}08 \cdot h_i / d_{п} + 0{,}10 \cdot h_i / d_{п} \cdot r_{п} / d_{п} - 0{,}35 r_{п} / d_{п}\right), \tag{7.2}$$

где h_i – глубина вытяжки на *i*-й стадии процесса; R – радиус кромки заготовки.

Важной особенностью процесса является преобладание в зоне ОПД свободных поверхностей заготовки $F_{ñâ}$ над контактными $F_{ê}$ ($F_{ñâ}/F_{ê} > 1{,}0$). Следствием этого будет создание плоской схемы напряженного состояния в очаге деформации. Локальный характер пластической деформации определяет неравномерность распределения напряжений и деформации вдоль образующей на каждой стадии процесса (см. рис. 7.3). Из приближенного теоретического анализа напряженного состояния заготовки без учета сил контактного трения следует [7.1]:

$$\sigma_{\rho} = \sigma_i \ln\left(1 - \varepsilon_{\theta}^{кр}\right) \Big/ m; \tag{7.3}$$

$$\sigma_{\theta} = -\sigma_i \cdot \left(1 - \ln\left(1 - \varepsilon_{\theta}^{кр}\right) \Big/ m\right), \tag{7.4}$$

где $\varepsilon_{\theta}^{кр} = \left(1 - R/R_0\right)$ – относительная деформация кромки; $m = r/R_0$; $R_0 = D_0/2$; R_0, R, r – наибольшие радиусы исходной плоской, промежуточной полой заготовки и готовой детали; $\sigma_i = f\left(\varepsilon_i\right)$ – интенсивность напряжений; $\varepsilon_i = f\left(\rho\right)$ – интенсивность деформации; r – радиус сечения вытянутой заготовки (см. рис. 7.3).

На рис. 7.5 показаны схемы изменения параметров напряженного состояния вдоль образующей заготовки на промежуточной стадии процесса вытяжки.

Из анализа этих схем следует, что растягивающие напряжения σ_{ρ} изменяются от нуля в зоне кромки до своего наибольшего значения в граничном ($\rho^{гр}$) и опасном (ρ^{oc}) сечениях.

При этом

$$\sigma_{\rho}^{o.c} = \sigma_{\rho}^{гр} \cdot S^{гр} \big/ S^{o.c}, \tag{7.5}$$

где $S^{î.ñ}$, $S^{ãð}$ – толщины стенки заготовки в граничном и «опасном» сечениях заготовки соответственно. Так как отношение толщин $S^{ãð}/S^{î.ñ} > 1$, то и напряжение $\sigma_{\rho}^{o.c}$ будет больше $\sigma_{\rho}^{гр}$, т.е.

$$\sigma_{\rho}^{o.c} \big/ \sigma_{\rho}^{гр} > 1{,}0. \tag{7.6}$$

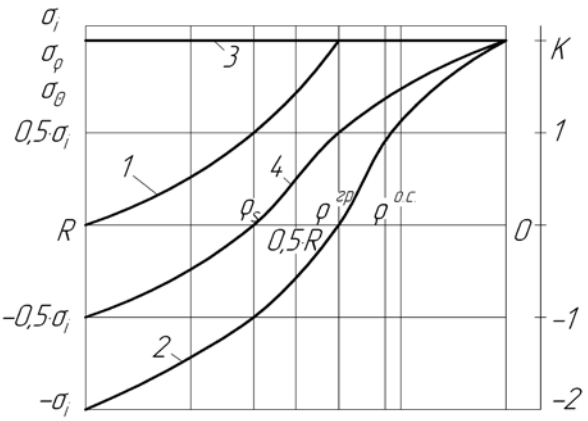


Рис. 7.5. Схема изменения параметров напряженного состояния вдоль образующей формируемой заготовки на промежуточной стадии процесса вытяжки: *1* – σ_ρ; *2* – σ_θ; *3* – σ_i; *4* – K

Тангенциальные сжимающие напряжения, наоборот, изменяются от своего максимального, по модулю, значения на кромке заготовки до нуля в граничном сечении, при $\rho = \rho^{гр}$, а затем меняют знак на обратный и становятся растягивающими, положительными.

Так как в центре дна заготовки деформация незначительна, то растягивающие напряжения будут меньшими по сравнению с напряжениями в «опасном» сечении заготовки.

Характер изменения параметров деформированного состояния заготовки ($\varepsilon_\rho, \varepsilon_n, \varepsilon_\theta, \varepsilon_i, \nu_\varepsilon$) показан на рис. 7.6.

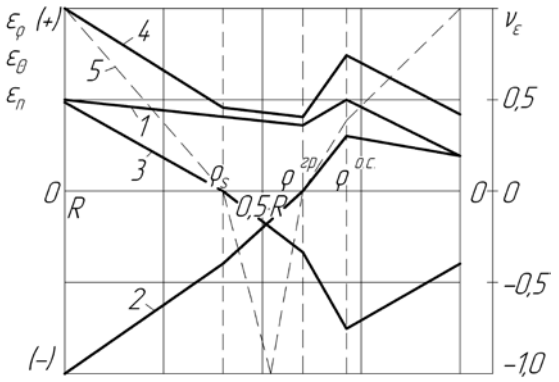


Рис. 7.6. Схема изменения параметров деформированного состояния вдоль образующей заготовки на промежуточной стадии процесса вытяжки: *1* – ε_ρ; *2* – ε_θ; *3* – ε_n; *4* – ε_i; *5* – ν_ε

7.2.2. Вытяжка без прижима из плоской неосесимметричной заготовки

В патронном производстве для изготовления металлических элементов патронов (гильз, пиростаканов, пульных оболочек) применяют также, в некоторых случаях, с целью снижения отхода металла при раскрое полосы и ленты плоские квадратные и шестигранные заготовки.

Отличие вытяжки таких заготовок от вытяжки кружков состоит в формировании в окружном направлении по кромке незамкнутого контура с образованием участков «впадин» и «фестонов». Фестоны образуются из угловых, а «впадины» из прямолинейных участков плоских квадратных или шестигранных заготовок. В случае вытяжки эквивалентных плоских заготовок, т.е. одинакового объема, но разной формы через одну и ту же матрицу с одинаковым коэффициентом вытяжки $m_d = d/D_0$ их напряженное и деформированное состояние в продольном направлении, от дна вытягиваемой заготовки до основания фестонов, практически не отличается от случая вытяжки кружка. Однако в вершине фестонов тангенциальные напряжения равны нулю ($\sigma_\theta = 0$), так как контур по периметру не замкнут. Это приводит к неосесимметричному характеру деформации в поперечных сечениях заготовки. При вытяжке квадратной или шестигранной заготовки деталь получается не строго цилиндрической формы. Диаметры детали, измеренные по фестону, больше, чем по впадине (табл. 7.1), т.е. в плане деталь приобретает форму многогранника (четырех- или шестиугольная огранка). Более заметно это проявляется в толстостенных заготовках. Для квадратных заготовок разница в поперечных размерах составляет 3,5…4,0% и несколько больше, чем для шестигранника, где она находится в пределах 2,5…3,0%. Более существенное влияние оказывает форма исходной плоской заготовки на поперечную разнотолщинность – разностенность штампуемой детали, ввиду выраженной неоднородности деформации в окружном, тангенциальном, направлении в квадратных и шестигранных заготовках. Во «впадинах» толщина стенки превышает толщину кромки у деталей, изготовленных из кружка. По фестону толщина стенки минимальна и, как правило, меньше толщины исходной полосы (ленты). В табл. 7.1 даны для сравнения числовые значения размеров вытянутых из кружков и квадратов колпачков, разностенности δ_S и овальности δ_d, рассчитанных по формулам

$$\delta_d = \left(\left(d_{\max} - d_{\min}\right)/d_{\text{ср}}\right)\cdot 100\%;$$

$$\delta_S = \left(\left(S_{\max} - S_{\min}\right)/S_{\text{ср}}\right)\cdot 100\%,$$

где $d_{\max}$, $d_{\min}$, $S_{\max}$, $S_{\min}$, $d_{\text{ñð}}$, $S_{\text{ñð}}$ – максимальные, минимальные и средние значения наружных диаметров и толщин стенок колпачков в поперечных сечениях, проходящих через основания «фестонов» для квадратных заготовок и совпадающих с торцем для кружков.

Таблица 7.1

Размеры и показатели качества формы штампуемых деталей ($d_м = 25{,}4$ мм , $m_d = 0{,}62$)

Форма исходной плоской заготовки	Материал заготовки	Размеры детали, мм				Показатели качества,%	
		«фестон»		«впадина»			
		d	S	d	S	δ_d	δ_S
Квадрат	Биметалл-3, S_0 =1,37 мм	26,35	1,38	25,53	2,37	3,16	70,0
	Биметалл-1, S_0 =2,87мм	26,20	2,80	25,32	3,46	3,42	21,0
Кружок	Биметалл-3, S_0 =1,37 мм	25,75	1,65	25,40	1,58	1,30	4,3
	Биметалл-1, S_0 =2,87мм	25,75	3,30	25,40	25,40	1,40	1,5

Разнотолщинность в продольном сечении, проходящем через «фестон» практически отсутствует, в то время как в продольном сечении «впадины» она весьма значительна (в радиусной части толщина стенки на 5…7% меньше, а на кромке на 20…40% больше исходной). Сечение, в котором толщина стенки не изменяется по сравнению с исходной, находится примерно на границе перехода от цилиндрической части к радиусной.

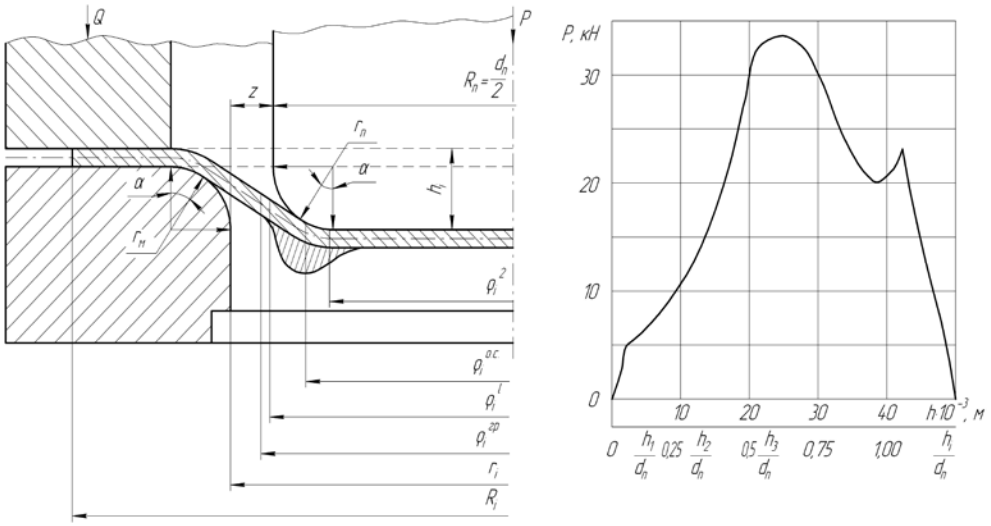
7.2.3. Вытяжка с прижимом из плоской заготовки

Способы вытяжки с прижимом применяют для изготовления деталей с фланцем, а также для предотвращения образования радиальных складок при изготовлении деталей без фланца. Прижим создает распределенное по поверхности краевой части деформируемой заготовки нормальное контактное давление, а также служит механическим препятствием выпучиванию участков заготовки, в особенности при жестком прижиме (рис. 7.7).

Среднее удельное усилие прижима $q_{пр}$ равно отношению полного усилия прижима Q к площади поверхности контакта прижима и заготовки $F_к$, т.е.

$$q_{пр} = Q/F_к , \qquad (7.7)$$

где $F_к = \pi[R_0 - (r + r_м)^2]$; $R_0 = D_0/2$; $r = d/2$; d – наружный диаметр цилиндрической стенки детали; $r_м$ – радиус вытяжной кромки матрицы. Ввиду того, что требуемое для предупреждения складкообразования удельное усилие прижима $q_{пр}$ значительно меньше предела текучести $\sigma_{0,2}$ материала заготовки (на порядок и более) схема напряженного состояния в основном очаге пластической деформации (ОПД-2) сохраняется плоской. Поэтому вытяжке присущи те же основные технологические особенности, что и для вытяжки без прижима (см. п. 7.2.2).



а *б*

Рис. 7.7. Схема формообразования (*а*) заготовки на промежуточной стадии процесса первой вытяжки с прижимом и машинная диаграмма «*P-h*» (*б*) ($r_1 / S_0 = 10$, $r_1 / S_0 = 10$, $r_1 / R_1 = 0{,}25$, $z / S_0 = 1{,}1$, $Q = 4900$ Н)

Однако создание давления прижима на краевую часть заготовки приводит к увеличению меридиональных растягивающих σ_ρ и уменьшению тангенциальных сжимающих σ_θ напряжений. Последнее повышает устойчивость заготовок и снижает опасность складкообразования. На основе анализа напряженного состояния заготовки [2, 3] получены приближенные формулы для расчета максимальных растягивающих напряжений σ_ρ на промежуточной стадии процесса, соответствующей достижению максимального усилия вытяжки:

- на промежуточной стадии

$$\sigma_{\rho i\max} = \sigma_i \cdot \left[\ln\frac{R}{r} + \frac{f \cdot Q}{\pi \cdot R \cdot S \cdot \sigma_i} + \frac{1}{\left(2 \cdot r_м / S_0 + 1\right)} \right] \left(1 + 1{,}6\, f\right); \qquad (7.8)$$

- на стадии достижения максимального усилия $P_{\max}$

$$\sigma_{\rho i\max} = A\left(\frac{1}{2}\ln\frac{1}{m}\right)^n \cdot \left[\ln\frac{0{,}9}{m} + \frac{1{,}1 \cdot f \cdot q_{пр} \cdot F_к}{\pi \cdot A \cdot \left(1/2 \cdot \ln(1/m)\right)^n} + \frac{1}{\left(2 \cdot r_м / S_0 + 1\right)} \right] \left(1 + 1{,}6\, f\right), \qquad (7.9)$$

где $\sigma_i = A_{i\,ср}^n$ при $0{,}002 \le \varepsilon_i \le \varepsilon_{iy}$; $\sigma_i = \sigma_{iy}^{2n}\left(1 + 0{,}5\varepsilon_i - \varepsilon_{iy}\right)$ при $2\varepsilon_{iy} \le \varepsilon_i \le \varepsilon_{i\rho}$; $n = \varepsilon_{iy}$; $A = \sigma_{iy} \big/ \varepsilon_{iy}^n$; $\varepsilon_{i\,ср} = 1/2 \cdot \ln(1/m)$ среднее значение интенсивности деформации во фланце; ε_{iy}, σ_{iy}, $\varepsilon_{i\rho}$, n – характеристики механических свойств материала заготовки (справочные величины, разд. 2).

Тангенциальное напряжение может быть определено из условия пластичности после подстановки в него значения σ_ρ из уравнения (7.8).

Схема процесса формообразования заготовки на промежуточных стадиях вытяжки показана на рис. 7.8.

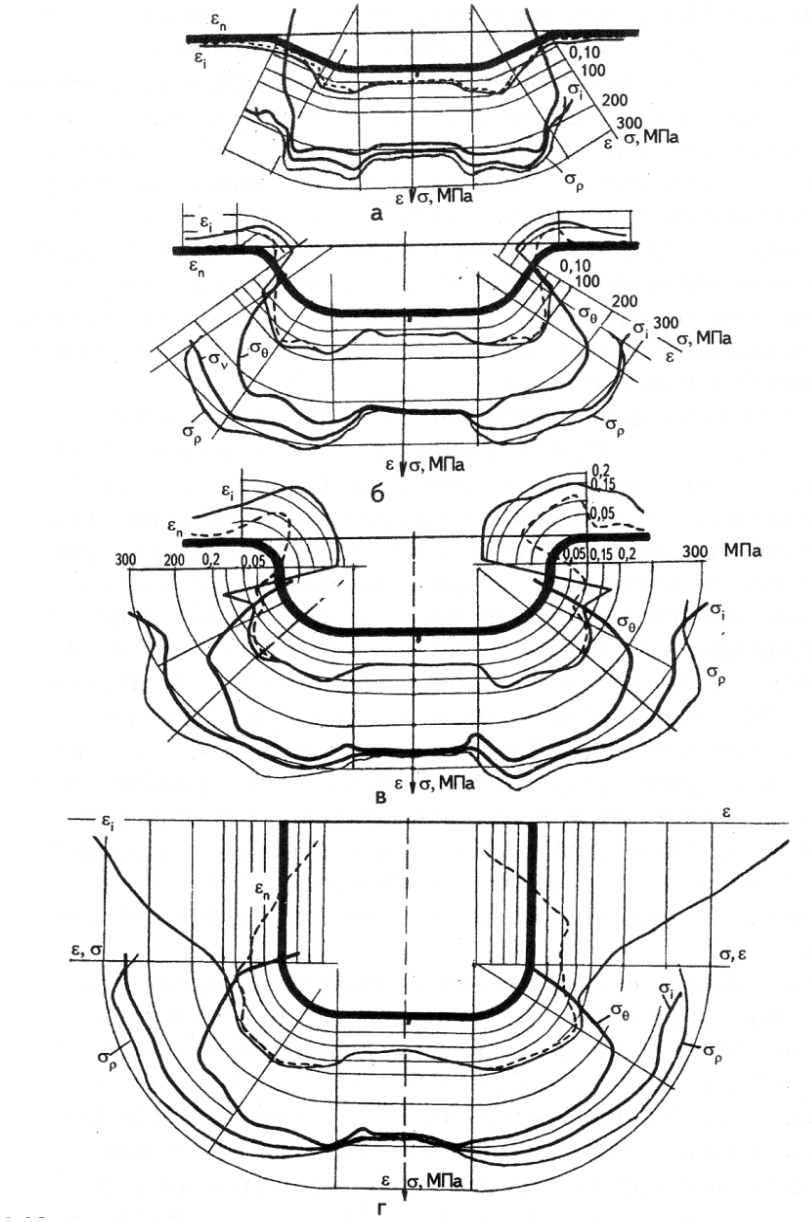


Рис. 7.8. НДС заготовки на различных стадиях процесса вытяжки с прижимом: *а–г* – первой–четвертой соответственно

Наличие прижима изменяет характер формообразования краевой части заготовки, так как с самого начала процесса оформляется плоский фланец. На второй стадии происходит одновременно изгиб и растяжение в зонах вытяжных кромок пуансона и матрицы при сохранении прямолинейной образующей, а на третьей образуется цилиндрическая стенка заготовки. На четвертой стадии краевая часть заготовки протягивается через цилиндрический поясок матрицы (см. рис. 7.8).

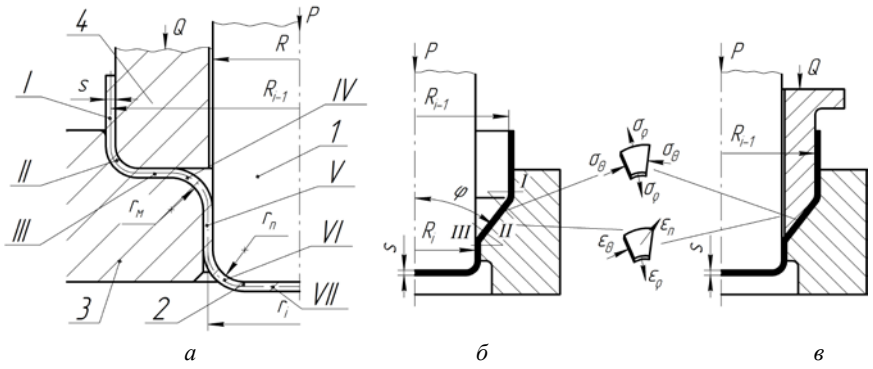
На основании анализа формул (7.8), (7.9) выделим основные технологические факторы, влияющие на максимальные растягивающие напряжения:

- механические свойства материала исходной заготовки, поступающей на вытяжку, σ_{iy}, ε_{iy}, n (с увеличением σ_{iy}, ε_{iy}, n напряжение растет);
- коэффициент вытяжки (чем меньше его значение, тем больше интенсивность деформации ε_i в зоне ОПД-2 и тем больше $\sigma_{\rho\max}$);
- удельное усилие прижима q (с его увеличением напряжение $\sigma_{\rho\max}$ возрастает);
- относительный радиус вытяжной кромки матрицы r_1/S (чем меньше радиус, тем больше напряжения и жестче условия вытяжки);
- условия контактного трения, характеризуемые коэффициентом трения f (повышение коэффициента трения отрицательно влияет не только на напряжения, но и на качество штампуемых деталей).

Приведенный анализ не учитывает в соответствии с принятыми допущениями изменение толщины заготовки в процессе вытяжки, влияние изгиба на вытяжной кромке пуансона и некоторые другие факторы

7.2.4. Последующая вытяжка

При последующей вытяжке исходной заготовкой служит полый полуфабрикат, полученный из плоской или также полой заготовки. Этот процесс может быть реализован в тороидальной (рис. 7.9,*а*) или в конической (рис. 7.9,*б*,*в*) матрицах, и ему присущи в основном технологические особенности, рассмотренные ранее. В целом процесс последующей, так же как и первой вытяжки, является нестационарным, состоит из трех стадий, хотя существует промежуточная, квазистационарная стадия, в пределах которой форма и размеры ОПД-2 могут сохраняться постоянными при достаточно большой высоте заготовки. Следствием этого будет малое изменение напряжений и усилий в пределах квазистационарной стадии при некотором их увеличении за счет утолщения стенки краевой части и упрочнения материала к концу стадии. Первая нестационарная стадия процесса характеризуется развитием локального очага деформации (ОПД-1) только в области радиуса закругления пуансона с формированием потенциально опасного сечения при двустороннем растяжении ($\sigma_\rho > 0$, $\sigma_\theta > 0$) (рис. 7.10,*а*).



а *б* *в*

Рис. 7.9. Схемы процесса последующей вытяжки в тороидальной (*а*) и конической (*б*) матрицах с прижимом (*а, в*) и без прижима (*б*): *1* – пуансон; *2* – заготовка; *3* – матрица; *4* – прижим

Центральная часть дна заготовки и зона стенки практически не деформируются (рис. 7.10,*а*). На промежуточной квазистационарной стадии процесса (рис. 7.10,*б*,*в*,*г*) формируются второй очаг пластической деформации (ОПД-2) с разноименной схемой напряженного состояния ($\sigma_\rho > 0$, $\sigma_\theta < 0$) и цилиндрическая стенка заготовки меньшего по сравнению с первоначальным диаметром ($d_i < d_{i-1}$). При дальнейшем ходе пуансона ОПД-1 распространяется на всю донную часть заготовки. В конце этой стадии процесса растягивающие напряжения в опасном сечении достигают своего максимального значения $\sigma_\rho^{\text{o.c}}{}_{\max}$, что сопровождается ростом компонента деформации $\varepsilon_n^{\text{o.c}}$ и смещением опасного сечения вверх по радиусному скруглению по направлению к цилиндрической стенке. Заключительная, третья, нестационарная стадия процесса (рис. 7.10,*д*) при оптимальных условиях вытяжки заключается в протягивании краевой части заготовки через цилиндрический поясок матрицы и сопровождается падением растягивающих напряжений в опасном сечении заготовки ниже предела текучести и технологического усилия до нуля. При отклонении от оптимальных условий возможны защемление краевой части заготовки и обрыв дна (в зоне опасного сечения).

Неоднородность НДС проявляется на всех стадиях процесса. Наиболее сильно она выражена на промежуточной стационарной стадии в виде семи характерных участков заготовки (рис. 7.9,*а*): *I* – пластически не деформируемый; *II* – участок свободного изгиба, в котором заготовка деформируется без контакта с инструментом ($\sigma_\rho > 0$, $\sigma_\theta < 0$, $\sigma_n \cong 0$); *III* – плоский или конический участок, контактирующий с матрицей ($\sigma_\rho > 0$, $\sigma_\theta < 0$, $\sigma_n \le 0$); *IV* – участок, в котором заготовка деформируется, перемещаясь по торообразной поверхности, образованной скруглением рабочей кромки матрицы; *V, VI, VII* – участки вновь сформированной цилиндрической стенки диаметром d_i, скругления на вытяжной кромке пуансона и дна, не подвергаемые пластической деформации при нормальных условиях на этой стадии.

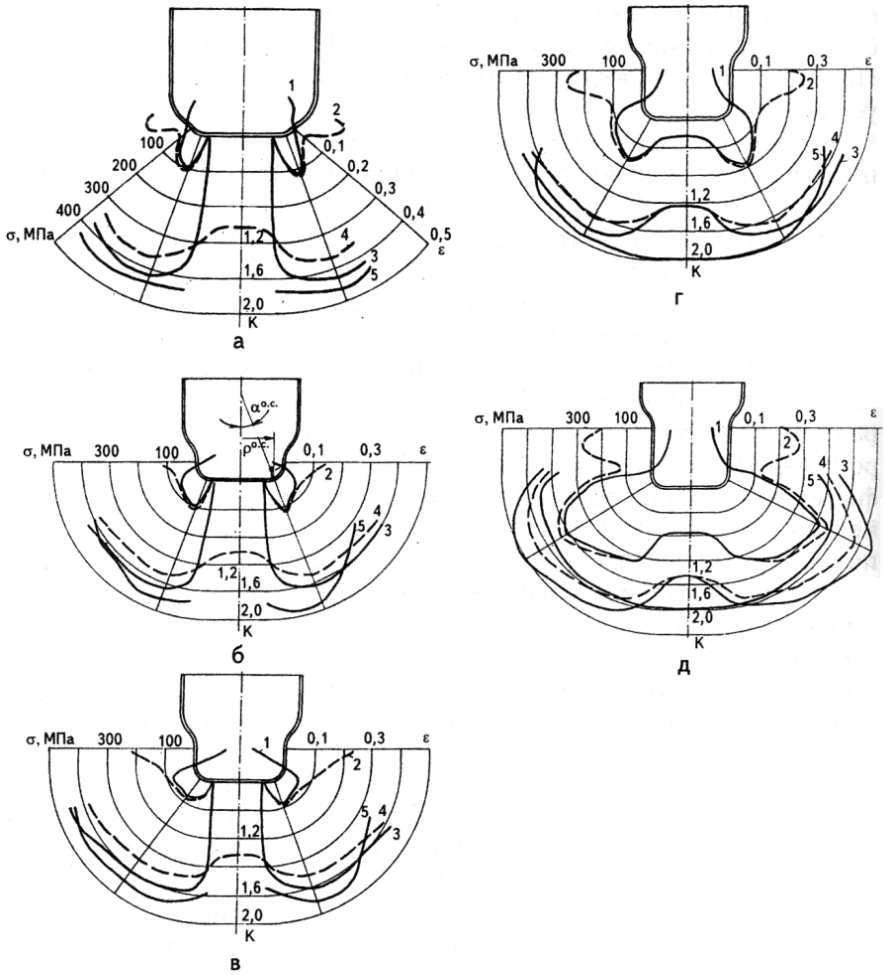


Рис. 7.10. Изменение параметров НДС ε_n (кривая *1*), ε_i (кривая *2*), σ_ρ (кривая *3*), σ_i (кривая *4*), *K* (кривая *5*) вдоль образующей латунной заготовки (Л63) при вытяжке пуансоном с $r_п$ = 5 мм и относительной глубине вытяжки $h_i / d_п$ соответственно: *а* – 0,13; *б* – 0,30; *в* – 0,47; *г* – 0,67; *д* – 0,87

На границах между очагом деформации и недеформируемыми участками, а также на границах участков *II, III* и *IV* резко изменяется кривизна срединной поверхности заготовки. Это качественно влияет на увеличение растягивающих напряжений, так же как и на первой вытяжке, что при анализе учитывается в граничных условиях. Для анализа напряженного состояния применяют тот же метод совместного решения приближенных уравнений равновесия и пластичности в граничных условиях и те же допущения.

Е.А. Поповым [2] получена следующая формула для расчета наибольших меридиональных растягивающих напряжений при вытяжке в конической матрице:

$$\sigma_{\rho\max} = \sigma_i \left[\left(1 + \frac{f}{\operatorname{tg}\alpha} \right)(1 - m_i) + \sqrt{\frac{S}{d_{i-1}}} \sin\alpha_i + \frac{1}{(2r_{\text{м}}/S + 1)} \right](1 + f\alpha). \qquad (7.10)$$

Формула (7.10) позволяет определять наибольшее растягивающее напряжение, действующее на границе ОПД и цилиндрической стенки с учетом влияния сил трения, изгиба и геометрических параметров рабочего инструмента ($\alpha, r_{\text{м}}/S$), но без учета упрочнения и изменения толщины в процессе деформирования. Из этой формулы следует, что угол конусности α влияет неоднозначно и существует его оптимальное значение, при котором напряжения σ_ρ будут наименьшими:

$$\sin\alpha_{\text{опт}} \cong \sqrt{f(1-m)\sqrt{d_{i-1}/S}} \ . \qquad (7.11)$$

Деформационное упрочнение может быть учтено при использовании аналитических аппроксимаций (7.9) функции $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$.

7.3. Вытяжка деталей коробчатой формы

В патронном производстве для укупорки патронов применяют прямоугольные металлические коробки и крышки к ним, изготавливаемые способами вытяжки без утонения. Из-за отсутствия осевой симметрии вытяжка коробок существенно отличается от вытяжки цилиндрических деталей. В зависимости от отношения высоты коробки H к ее ширине B различают способы вытяжки низких ($H/B \leq 0{,}6\ldots0{,}8$) и высоких ($H/B > 0{,}6\ldots0{,}8$) коробок. При этом отношение углового радиуса $r_{\text{у}}$ к B должно удовлетворять неравенству $r_{\text{у}}/B \geq 0{,}1$. Основное отличие способа вытяжки коробки состоит в неоднородности распределения напряжений и деформации по периметру штампуемой заготовки. Наиболее деформируемыми являются угловые участки (рис. 7.11), которые характеризуются примерно той же, что и при вытяжке цилиндрических деталей, схемой НДС на различных участках. Однако в окружном направлении на угловых участках действуют не только главные нормальные (σ_ρ и σ_θ), но и касательные напряжения $\tau_{\rho\theta}$ и (по закону парности) $\tau_{\theta\rho}$. Они возникают из-за отсутствия осевой симметрии деформирования и, следовательно, неравномерного распределения деформации по контуру детали. На биссектрисе углового участка касательные напряжения отсутствуют (в связи с тем, что это ось симметрии углового участка), а в месте сопряжения криволинейных и прямолинейных участков контура достигают своих максимальных значений.

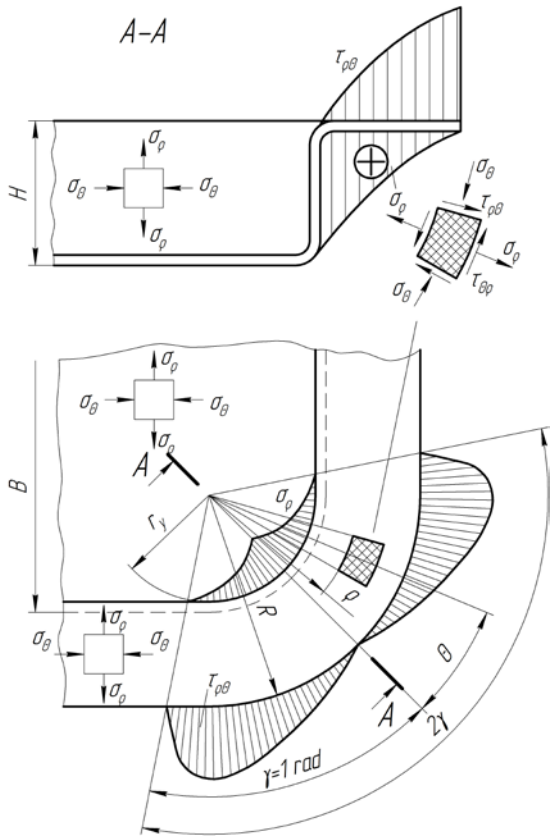


Рис. 7.11. Эпюры напряжений во фланце коробчатой детали при вытяжке

Вследствие сплошности материала заготовки касательные напряжения убывают в двух взаимно противоположных направлениях: к биссектрисе угла 2γ и в направлении прямолинейных участков контура. Изменяются они и по ширине фланца, увеличиваясь по мере приближения к периферийной его части.

В работе А.Г. Овчинникова дана формула для расчета меридиональных напряжений:

$$\sigma_\rho = \left[\frac{\sigma_i}{\gamma\sqrt{3}}\right]\left[\ln\left(\frac{R}{\rho}\right) - \theta^2\right] + \frac{fQ}{\pi RS}.$$

При $\rho = r_y$ и $\theta = 0$ меридиональное растягивающее напряжение достигает своего максимального значения:

$$\sigma_{\rho\,\max} = \frac{\sigma_i}{\gamma\sqrt{3}}\ln\frac{R}{r_y} + \frac{fQ}{\pi RS}. \qquad (7.12)$$

Экспериментально установлено, что угол γ, определяющий протяженность очага интенсивной пластической деформации, приближенно равен одному радиану (γ = 1 rad). В этом случае максимальное по очагу деформации меридиональное растягивающее напряжение будет равно:

$$\sigma_{\rho\,\max} = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \ln \frac{R}{r_{\text{у}}} + \frac{fQ}{\pi RS}. \qquad (7.13)$$

Сопоставление с величиной растягивающих напряжений, действующих при вытяжке цилиндрических деталей, свидетельствует об их меньшей в 1,73 раза величине при вытяжке коробок. Это является следствием разгружающего действия касательных напряжений.

При вытяжке тонкостенных коробчатых деталей в угловых участках возникают тангенциальные сжимающие напряжения, большие по значению, чем действующие на прямолинейных участках заготовки. В связи с этим при разгрузке возникают различные упругие деформации в угловых и прямолинейных участках, что может сопровождаться выпучиванием стенок от действия сжимающих напряжений. Если придать стенкам коробки слегка выпуклую овальную форму или подвергнуть ее правке растяжением стенок на 2,5…4,0% в специальном штампе с раздвижным секторным пуансоном, то этого можно избежать.

Для вытяжки низкой коробчатой детали применяется чаще всего прямоугольная заготовка со срезанными или с профилированными углами.

Известна методика В.П. Звороно для построения контура исходной заготовки, которая предполагает выполнение следующих расчетных процедур с применением схемы, представленной на рис. 7.12.

1. Вычерчивают контур детали в плане и выполняют развертку прямолинейных участков с определением длины развертки l (считая от плоского участка дна детали) по формуле гибки:

$$l = H + 0{,}57\, r_{\text{д}}. \qquad (7.14)$$

2. Рассчитывают радиус R_0, необходимый для получения цилиндра вписанного в угловой участок коробки из условия равенства поверхности заготовки и детали:

$$R_0 = \left[r_{\text{у}} \left(r_{\text{у}} + 2H \right) - r_{\text{ä}} \left(0{,}86 r_{\text{у}} + 0{,}14 r_{\text{ä}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \qquad (7.15)$$

где $r_{\text{д}}$ – радиус сопряжения стенки и дна цилиндра (при малом $R \cong \sqrt{r_{\text{у}}(r_{\text{ó}} + 2H)}$.

3. Радиусом R_0 из центра O проводят дугу до пересечения с прямыми O_c и O_d, ограничивающими прямолинейные участки.

4. Отрезки *ad* и *bc* делят пополам (точки *m* и *n* соответственно), и через эти точки проводят касательные к дуге *ab*.

5. Касательные, проведенные через точки *m* и *n*, и прямолинейные участки контура заготовки сопрягают дугами радиусом R_0.

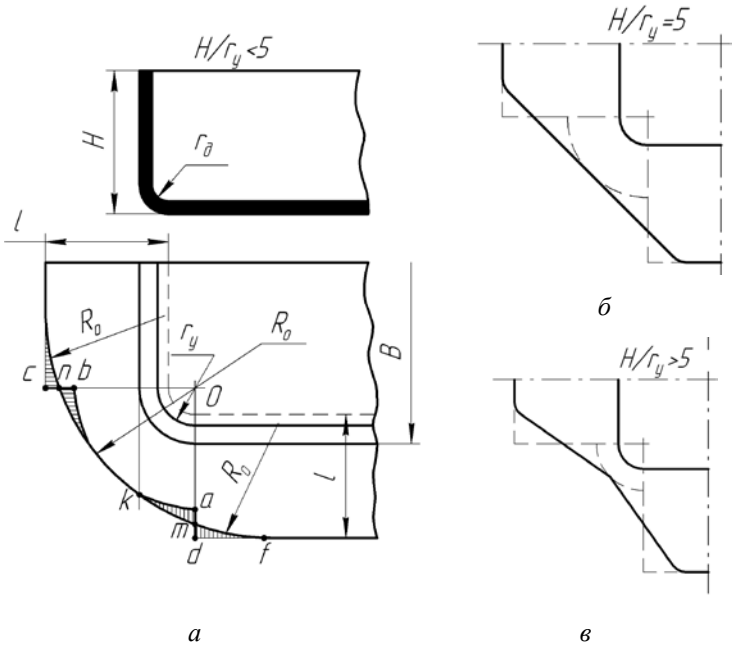


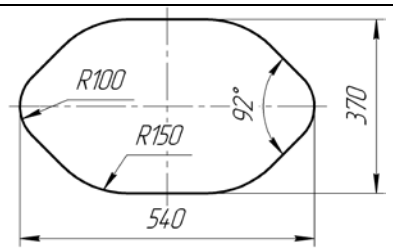
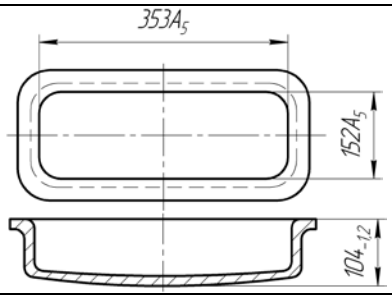
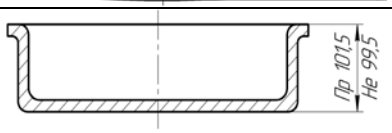
Рис. 7.12. Схемы построения угловых участков исходных заготовок для вытяжки низких коробчатых деталей

Форма углового участка исходной заготовки зависит от отношения H/r_y. При $H/r_y < 5$ контур выпуклый (рис. 7.12,*а*), при $H/r_y = 5$ – прямолинейный (рис. 7.12,*б*), при $H/r_y > 5$ – вогнутый (рис. 7.12,*в*). Ввиду неравномерного распределения параметров НДС по контуру заготовки, а также ввиду анизотропии механических свойств материала вытяжка коробчатых деталей отличается от вытяжки цилиндрических еще большей разновысотностью и разной шириной фланца (при его наличии). Это обязывает вводить обрезку по высоте или по фланцу. Форму и размеры заготовки уточняют при отработке технологии.

Типовой технологический процесс изготовления прямоугольной коробки, применяемый в патронном производстве, приведен в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Маршрутный технологический процесс изготовления металлической коробки

Операция	Эскиз заготовки	Тип технологического оборудования
1. Протирка ленты и вырубка заготовки		Автомат АПЛ Пресс К-2130Б
2. Смазывание заготовки и вытяжка		Пресс К-480
3. Калибровка и обрезка фланца		Пресс фрикционный Ф-1728

7.4. Технологические возможности и ограничения процессов вытяжки

Технологические возможности процессов вытяжки определяются областью их рационального применения по основным конструктивно-технологическим характеристикам изготавливаемых деталей и технико-экономическим показателям реализуемых процессов. Система ограничений в процессах вытяжки должна гарантировать бездефектное изготовление деталей с заданными эксплуатационными характеристиками и экономически целесообразную стойкость рабочего инструмента и технологической оснастки. Получение при вытяжке дефектных деталей квалифицируется как технологический отказ. Понятие и термин «отказ» заимствованы из теории надежности и в формальном смысле определены как любое событие, возникающее при функционировании объекта анализа, в нашем случае процесса вытяжки, нарушающее его работоспособное состояние. За работоспособное принимается такое состояние процесса вытяжки, при котором значения всех его технологических параметров не превышают допустимых значений, обеспечивающих требуемое качество изготавливаемых изделий. На основе анализа технологи-

ческих особенностей процесса вытяжки по критериям качества штампуемых деталей выделим следующие группы возможных технологических отказов:

1) нарушение заданной геометрии детали;

2) нарушение качества поверхности детали;

3) нарушение сплошности материала деформируемой заготовки.

Нарушение заданной геометрии штампуемой детали может быть вызвано:

• потерей устойчивости заготовки в области малых упруго-пластических деформаций и, как следствие, складкообразованием краевой части заготовки от действия тангенциальных сжимающих напряжений σ_θ;

• потерей устойчивости пластического деформирования заготовки и, как следствие, локальное утонение стенки заготовки на ее криволинейных участках, контактирующих с вытяжной кромкой пуансона или с вытяжной кромкой матрицы от действия максимальных меридиональных растягивающих напряжений $\sigma_{\rho\,max}$;

• нарушением условий осесимметричной деформации при вытяжке неосесимметричных заготовок (квадратных, шестигранных и т.п.) или при использовании листовых заготовок с выраженной анизотропией свойств;

• нарушением заданной точности размеров штампуемой детали по причине неравенства объемов исходной заготовки чертежному объему детали и отклонение от оптимальных значений зазоров при вытяжке.

Очаг потери устойчивости заготовки в области малых упруго-пластических деформаций находится в границах ОПД-2, где действуют тангенциальные сжимающие напряжения σ_θ, т.е. на краевом участке заготовки при $R < \rho < \rho^{гр}$.

Размеры ОПД изменяются с начала пластической деформации ввиду уменьшения ширины фланца

$$a = R - \rho^{гр}. \tag{7.16}$$

Условие потери устойчивости этого вида записывается в напряжениях:

$$\sigma_\theta \geq \sigma_{\theta\,кр}\ , \tag{7.17}$$

где $\sigma_{\theta\,кр}$ – критическое значение тангенциального сжимающего напряжения.

Действующее в очаге потери устойчивости тангенциальное сжимающее напряжение определяется из приближенного условия пластичности [2]:

$$\sigma_\theta = -(\sigma_i - \sigma_\rho)\ . \tag{7.18}$$

Для случая вытяжки без прижима тангенциальное напряжение определяется по формуле (7.4), для случая вытяжки с прижимом – по формуле (7.18) с учетом (7.8) и (7.9).

Критическое значение тангенциального сжимающего напряжения $\sigma_{\theta кр}$ в условии (7.17) может быть определено из приближенного соотношения [3]:

$$\sigma_{\theta кр} = \lambda \overline{E}_0 (S/D)_{кр} \frac{1}{(1 - d/D_{кр})^2} \eta, \qquad (7.19)$$

где λ = 1,84…2,32; $\overline{E}_0 = \frac{4EE_{ê}}{\left(\sqrt{E} + \sqrt{E_{ê}}\right)^2}$ – приведенный модуль; E – модуль упругости; $E_к = d\sigma_i / d\varepsilon_i = f(\varepsilon_i)$ касательный модуль (определяется по диаграмме $\sigma_i - \varepsilon_i$); $(S/D)_{êð}$ – критическое значение относительной толщины кромки заготовки, при котором появляются складки (гофры); η – коэффициент, учитывающий условия защемления края (фланца) заготовки (при жестком защемлении $\eta = \infty$ и складкообразование полностью исключено, при отсутствии защемления $\eta = 1$, при частичном защемлении $1 < \eta < \infty$). Из условий равенства действующего σ_θ и критического $\sigma_{\theta кр}$ напряжений получим выражение для качественной оценки влияния основных технологических факторов на критическое значение относительной толщины заготовки $(S/D)_{êð}$:

$$(S/D)_{êð} = (1 - d/D) C_\sigma, \qquad (7.20)$$

где $C_\sigma = \left[\frac{1}{\eta\lambda} \frac{\sigma_i}{\overline{E}_0} \left(1 - \frac{\sigma_\rho}{\sigma_i} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$.

В частном случае, при вытяжке без прижима ($\eta = 1$) в наименее устойчивой зоне, на кромке плоской заготовки $\sigma_\rho / \sigma_i = 0$ при $D = D_0$, критическое значение относительной толщины будет равно:

$$(S/D)_{êð} = (1 - m) C_{\sigma 0}, \qquad (7.21)$$

где $m = d/D_0$ – коэффициент вытяжки; $C_{\sigma 0} = \left(\sigma_i / \lambda \overline{E}_0 \right)^{\frac{1}{2}}$; это соотношение аналогично известной формуле Л.А. Шофмана и Е.А. Попова:

- для первой вытяжки

$$(S/D)_{êð} 100 = (4{,}5...5{,}5)(1 - m_1) \ ; \qquad (7.22)$$

- для последующей вытяжки

$$(S_{i-1}/d_{i-1})_{êð} 100 = (5...7)(1 - m_i). \qquad (7.23)$$

С учетом изложенного, вместо условия (7.17) используем условие потери устойчивости этого вида, выраженное через относительные толщины заготовок, поступающих на вытяжку:

$$S_0/D_0 > (S/D)_{êð}. \qquad (7.24)$$

Потеря устойчивости пластического деформирования связана с определенным изменением структуры металла, накоплением в нем поврежденности и резким уменьшением его способности к деформационному упрочнению, что характеризуется уменьшением касательного модуля (модуля пластичности) $E_{\text{к}} = d\sigma_i / d\varepsilon_i$ на диаграмме $\sigma_i - \varepsilon_i$. Следствием этого будет локализация деформации в виде появления кольцевой «шейки» в опасном сечении (о.с.) заготовки, как правило, на радиусном участке в зоне контакта с вытяжной кромкой пуансона с радиусом $r_{\text{п}}$. Условие потери устойчивости этого вида описывается неравенствами следующего вида:

$$\sigma_{\rho\,\max} \geq \sigma_{i\text{y}}^{\text{o.c}} \tag{7.25}$$

или

$$e_i^{\text{o.c}} \geq e_{i\text{y}}^{\text{o.c}} \tag{7.26}$$

или

$$\omega_i^{\text{o.c}} \geq \omega_{i\text{y}}^{\text{o.c}}, \tag{7.27}$$

где $e_i^{\text{o.c}} = \dfrac{2n\left(1 - m_\sigma^{\text{o.c}} + (m_\sigma^{\text{o.c}})^2\right)^{\frac{1}{2}}}{2 - m_\sigma^{\text{o.c}}}$; $m_\sigma^{\text{o.c}} = \sigma_\theta^{\text{o.c}} / \sigma_\rho^{\text{o.c}}$; $\omega_i^{\text{o.c}} = \left(e_i^{\text{o.c}} / e_{i\rho}^{\text{o.c}}\right)^a$

– коэффициент использования запаса (ресурса) пластичности; $e_{i\rho}^{\text{o.c}}$ – предельная до разрушения степень деформации в опасном сечении заготовки; $a = (a_0)^{1-0{,}14K^{\text{î.ñ}}}$; a_0 – характеристика свойств материала; $K^{\text{î.ñ}}$ – коэффициент жесткости схемы напряженного состояния. Условия устойчивости исключающие локализацию деформации записываются с обратным знаком:

$$\sigma_{\rho\,\max} \leq [\sigma_\rho^{\text{o.c}}] = \frac{\sigma_{i\text{y}}^{\text{o.c}}}{K_\sigma}; \tag{7.28}$$

$$e_i^{\text{o.c}} \leq [e_i^{\text{o.c}}] = \frac{e_{i\text{y}}^{\text{o.c}}}{K_e}; \tag{7.29}$$

$$\omega_i^{\text{o.c}} \leq [\omega_i^{\text{o.c}}] = \frac{\omega_{i\text{y}}^{\text{o.c}}}{K_\omega}, \tag{7.30}$$

где $[\sigma_\rho^{\text{o.c}}]$, $[e_i^{\text{o.c}}]$, $[\omega_i^{\text{o.c}}]$ – допустимые значения параметров; K_σ, K_e, K_ω – коэффициенты запаса, связанные следующими соотношениями:

$$K_\sigma = (K_e)^n = (K_\omega)^{\frac{n}{a}}, \tag{7.31}$$

где $K_e = 1{,}12 \ldots 1{,}14$.

Условия потери устойчивости можно рассматривать и как условия разрушения, так как при вытяжке тонколистового материала после локализации деформации в «опасном» сечении резко, лавинообразно уменьшаются размеры ОПД-1 в меридиональном направлении до размеров, соизмеримых с толщиной стенки, и происходит разрушение с образованием поперечной серповидной трещины.

Нарушение условий осесимметричной деформации наиболее характерно для случая вытяжки неосесимметричных заготовок (квадратных, прямоугольных, шестигранных) (см. п. 7.2.2), а также осесимметричных заготовок с выраженной анизотропией свойств.

Анизотропия свойств листового материала оценивается коэффициентами анизотропии:

- коэффициент нормальной анизотропии

$$R = \varepsilon_{\text{в}} / \varepsilon_S \ ;$$

- коэффициент поперечной деформации

$$r = R/(1+R) \, ;$$

- средний коэффициент анизотропии

$$R_{\text{ñð}} = 0{,}25(R_0 + 2R_{45} + R_{90}) \, ,$$

где $\varepsilon_{\text{в}}$, ε_S – деформации в направлении ширины и толщины образца соответственно; R_0, R_{45}, R_{90} – коэффициенты анизотропии в различных направлениях относительно направления прокатки.

При увеличении коэффициента $R > 1$ листовой материал лучше сопротивляется утонению в опасных зонах, что позволяет вести вытяжку с большими допустимыми степенями деформации. Вместе с тем, увеличение R приводит к нарушению осевой симметрии деформирования к появлению окружной разнотолщинности стенок штампуемой детали и волнистости ее кромок (образованию фестонов). Последнее требует введения в технологический процесс операций обрезки, что сопровождается увеличением отхода металла. Отклонение линейных и диаметральных размеров штампуемой детали может быть вызвано неточным расчетом размеров исходных заготовок ввиду несоответствия их объемов (V_0) или площадей (F_0) соответствующим значениям этих величин готовой детали, а также занижением или завышением, по сравнению с оптимальными значениями, зазоров между пуансоном и стенками матрицы.

Нарушение качества поверхности детали может быть вызвано:

- потерей устойчивости пластического деформирования с образованием полос и фигур текучести при малых пластических деформациях, не превышающих деформацию на длине площадки текучести ($\varepsilon_{i\,\text{т}}$) для стареющих материалов;
- износом рабочего инструмента и ухудшением качества его рабочих поверхностей;
- использованием некачественного материала и заготовок.

Разрушение деформируемой заготовки вызвано нарушением условий устойчивости пластического деформирования и прочности в «опасных» сечениях.

В табл. 7.3 в систематизированном виде даны виды технологических отказов, условия их появления и предотвращения.

Таблица 7.3

Технологические отказы, виды брака и условия ограничения деформации при вытяжке без утонения

Классификационная группа отказа	Вид технологического отказа	Вид брака	Условие появления отказа	Условие ограничения деформации
1	2	3	4	5
Нарушение заданной геометрии отштампованной детали	1.1. Потеря упругопластической устойчивости заготовки на начальных стадиях процесса вытяжки	1.1.1. Радиальные равномерно распределенные по периметру складки в сжато-растянутой краевой части заготовки (ОПД-2) при вытяжке без прижима или недостаточном давлении прижима (рис. 7.13)	а) $\sigma_\theta \ge \sigma_{\theta\,кр}$ или $\frac{S_0}{D_0} \le \left(\frac{S_0}{D_0}\right)_{êð}$ -для первой вытяжки	а) $\sigma_\theta \le [\sigma_\theta]$ или $\frac{S_0}{D_0} \ge \left[\frac{S_0}{D_0}\right]$ -для первой вытяжки
Нарушение заданной геометрии отштампованной детали	1.1. Потеря упругопластической устойчивости заготовки на начальных стадиях процесса вытяжки	1.1.2. Того же вида, что и 1.1.1., но неравномерно распределенные по периметру заготовки	б) $\frac{S_{i-1}}{D_{i-1}} \le \left(\frac{S_{i-1}}{D_{i-1}}\right)_{êð}$ -для последующей вытяжки	б) $\left(\frac{S_{i-1}}{D_{i-1}}\right) \ge \left[\frac{S_{i-1}}{D_{i-1}}\right]$ -для последующей вытяжки
		1.1.3. Радиальные, равномерно или неравномерно распределенные по периметру складки (волнистости) в сжато-растянутой зоне заготовки, размещенные между прижимом и пуансоном		
		1.1.4. Заштампованные радиальные складки в краевой части заготовки после протягивания через матрицу		
	1.2. Потеря устойчивости пластического деформирования заготовки на промежуточных стадиях процесса вытяжки	1.2.1. Значительное местное утонение заготовки на радиусном участке (в опасном сечении), контактирующем с вытяжной кромкой пуансона радиусом $r_п$	а) $\sigma_\rho^{o.c} \ge \sigma_{iy}^{o.c}$ б) $e_\rho^{o.c} \ge e_{iy}^{o.c}$	а) $\sigma_\rho^{o.c} \le [\sigma_i] = \frac{\sigma_{iy}^{o.c}}{K_\sigma}$ б) $e_\rho^{o.c} \le [e_i] = \frac{e_{iy}^{o.c}}{K_e}$
		1.2.2. Значительное местное утонение заготовки на радиусном участке, контактирующем с вытяжной кромкой матрицы радиусом $r_м$	в) $\omega_\rho^{o.c} \ge e_{iy}^{o.c}$	в) $\omega_\rho^{o.c} \le [\omega_i] = \frac{\omega_{iy}^{o.c}}{K_\omega}$

Продолжение табл. 7.3

1	2	3	4	5
Нарушение заданной геометрии отштампованной детали		1.2.3. Продольная (меридиональная) разнотолщинность стенки детали (рис. 7.16)		
	1.3. Нарушение условий осесимметричной деформации заготовки при вытяжке	1.3.1. Фестоны на кромке детали (рис. 7.14)	а) $R_{\text{ñð}} \geq R_{\text{ïð}}$	а) $R_{\text{ñð}} \leq [R] = K_{\text{ä}} \cdot R_{\text{ïð}}$
		1.3.2. Огранка (рис. 7.15,*а*)	б) $\delta_{S\,\text{ср}} \geq \delta_{S\,\text{пр}}$	б) $\delta_{S\,\text{ср}} \leq [\delta_S]$
		1.3.3. Овальность поперечного сечения (рис. 7.15,*б*)	в) применение неосесимметричной заготовки	в) применение осесимметричной заготовки
		1.3.4. Разностенность (разнотолщинность осевая и окружная) (рис. 7.16)		
		1.3.5. Разновысотность (косина)		
	1.4. Нарушение заданной точности размеров штампуемой детали	1.4.1. Отклонение высоты детали	$F_0 \neq F_{\text{ä}}$ $z \neq z_{\text{îïò}}$	$F_0 = F_{\text{ä}}$ $z = z_{\text{îïò}}$
		1.4.2. Отклонение поперечных размеров		
2. Нарушение качества поверхности отштампованной детали	2.1. Потеря устойчивости пластического деформирования при малых деформациях для стареющих материалов	2.1.1. Фигуры текучести в виде правильных логарифмических спиралей на поверхности деформируемых заготовок в сжато-растянутых зонах (краевой участок)	$e_i \leq e_{i\,\text{ò}}$	$e_i > e_{i\,\text{ò}}$
		2.1.2. Неправильные параллельные полосы текучести различной глубины, ширины и ориентации в зоне двухосного равномерного растяжения		
		2.1.3. Фигуры текучести в виде логарифмических спиралей и параллельных прямых на поверхностях деталей после повторного деформирования		
	2.2. Износ рабочих поверхностей инструмента, холодная сварка (налипание) металла заготовки и инструмента	2.2.1. Риски продольные, значительной протяженности, единичные и групповые	Нарушение условий контактного трения	Обеспечение оптимальных условий контактного трения
		2.2.2. Задиры		
		2.2.3. Большая шероховатость		

Окончание табл. 7.3

1	2	3	4	5
2. Нарушение качества поверхности отштампованной детали	2.3. Подача на вытяжку исходных заготовок из некачественного металла	2.3.1. Плены, раковины после прокатки	Нарушение качества поставляемого металла и заготовок	Обеспечение требуемого качества поставляемого металла и заготовок
		2.3.2. Неметаллические включения		
		2.3.3. Рябизна		
		2.3.4. Чешуйчатость с отслоениями и разрывами		
		2.3.5. Царапины и волосовины		
		2.3.6. Повышенная шероховатость		
3. Нарушение сплошности металла деформируемой заготовки	3.1. Разрушение	3.1.1. Поперечные трещины на радиусном участке заготовки, контактирующем с вытяжной кромкой пуансона радиусом $r_{п}$ (рис. 7.17,*а,б*)	а) $\sigma_i^{o.c} \geq \sigma_{i\rho}^{o.c}$ б) $e_i^{o.c} \geq e_{i\rho}^{o.c}$ в) $\omega_i^{o.c} \geq \omega_{i\rho}^{o.c} = 0$	а) $\sigma_\rho^{o.c} \leq [\sigma_\rho] = \frac{\sigma_{i\rho}^{o.c}}{K_\sigma}$ б) $e_\rho^{o.c} \leq [e_\rho] = \frac{e_{i\rho}^{o.c}}{K_e}$ в) $\omega_\rho^{o.c} \leq [\omega_\rho] = \frac{1}{K_\omega}$
		3.1.2. Поперечные трещины на радиусном участке заготовки, контактирующем с вытяжной кромкой матрицы радиусом $r_{м}$		
3. Нарушение сплошности металла деформируемой заготовки	3.1. Разрушение	3.1.3. Продольные трещины в зоне кромки (рис.7.17,*г*)		
		3.1.4. Поперечные трещины в краевой части заготовки (рис. 7.17,*в*)	а) Защемление в зазоре между пуансоном и матрицей краевой части заготовки со складками (гофрами) б) $z << z_{\tilde{i}\tilde{i}\grave{o}}$	а) Исключение складкообразования б) $z = z_{\tilde{i}\tilde{i}\grave{o}}$
		3.1.5. Наличие в металле исходных заготовок дефектов металлургического происхождения (см. 2.3.1…2.3.6.)	Исключение использования дефектных заготовок	

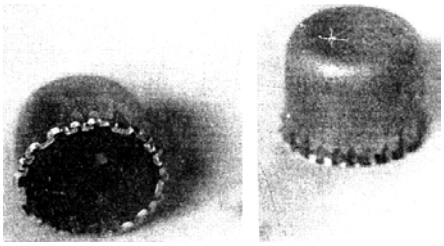
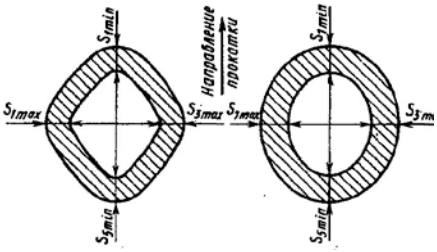


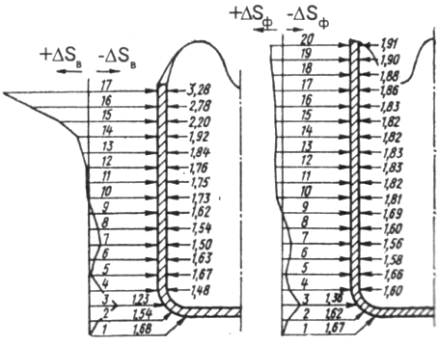
Рис. 7.13. Радиальные складки в краевой части заготовки после вытяжки без прижима

Рис. 7.14. Фестоны в краевой части заготовки



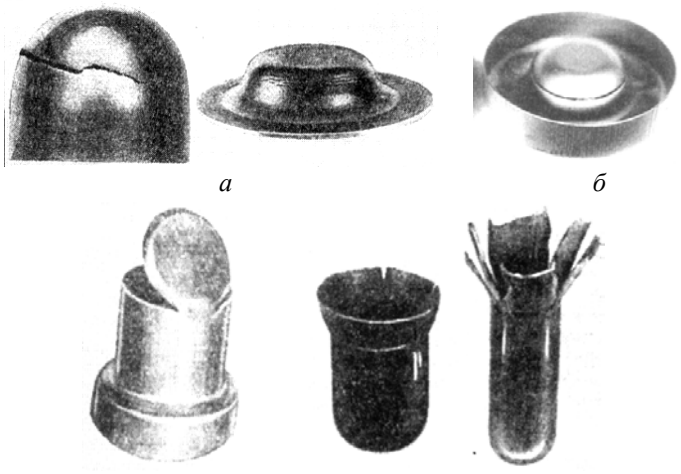
а *б*

Рис. 7.15. Схемы образования огранки (*а*) и овальности (*б*) при вытяжке



а *б*

Рис. 7.16. Осевая (меридиональная) разнотолщинность в продольных сечениях, проходящих через впадину (*а*) и фестон (*б*) на кромке заготовки



а *б*

в *г*

Рис. 7.17. Поперечные трещины на радиусных участках заготовки (*а*, *б*, *в*) и продольные трещины в зоне кромки (*г*)

7.5. Технологические требования, предъявляемые процессом вытяжки к конструкции штампуемых деталей

Применительно к процессам вытяжки под технологичностью конструкции детали следует понимать степень ее пригодности к изготовлению способами вытяжки за наименьшее количество операций при обеспечении устойчивости и прочности заготовки в процессе вытяжки и заданного уровня качества штампуемой детали. Основные технические показатели технологичности – штампуемость исходного материала, степень геометрической сложности штампуемой детали, степень сложности физико-механических свойств.

К показателям штампуемости материала относятся те из них, которые существенно влияют на устойчивость и прочность заготовок при вытяжке, а именно:

- сопротивление материала деформированию ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_т$, $\sigma_в$, σ_i);
- способность к деформационному упрочнению ($\sigma_{0,2}/\sigma_в$, n);
- предельная до потери устойчивости деформация (ε_{iy}, δ_y);
- предельные ($m_{пр}$) и допустимые ($m_{доп}$) значения коэффициентов вытяжки.

Ориентировочная оценка ТКИ по штампуемости материала может быть выполнена по выделенным в табл. 7.4 контрольным уровням технологичности.

Основные параметры, характеризующие степень геометрической сложности конструкции вытягиваемой детали:

- форма;
- количество конструктивных элементов $N_э$, в том числе унифицированных $N_у$, стандартизованных $N_{ст}$ и повторного применения $N_{пт}$;
- габаритные размеры (H, d);
- безразмерные геометрические параметры (относительная высота $\overline{H} = H/d$, относительная толщина стенки $\overline{S_D} = S/d$, относительный радиус сопряжения стенки и дна $\bar{r}_{ñ} = r_{ñ}/S$, относительный диаметр фланца $\overline{D}_{ô} = D_{ô}/d$, относительный радиус сопряжения стенки и фланца $\bar{r}_{ô} = r_{ô}/S$ и др.);
- допускаемые отклонения на размеры и форму (разнотолщинность, разновысотность, огранку и др.).

Таблица 7.4

Оценка ТКИ по штампуемости материала

Уровни технологичности	Показатели ТКИ			
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}/\sigma_в$	$n \cong \varepsilon_{iy}$	$m_{пр}$
Высокий	Менее 320	Менее 0,60	Более 0,25	Более 0,60
Средний	320…600	0,60…0,70	0,25…0,15	0,50…0,60
Низкий	Более 600	Более 0,70	Менее 0,15	Менее 0,50

По форме к деталям высокой технологичности относятся одноступенчатые цилиндрические без фланца ($N_э = 2…3$); к деталям средней технологичности – одноступенчатые цилиндрические с фланцем, осесимметричные конические и с криволинейной образующей с фланцем и без фланца, симметричные типа прямоугольных, квадратных и овальных коробок ($N_э = 3…5$) к деталям низкой технологичности – многоступенчатые, с различной формой образующей, несимметричные.

По габаритным размерам (H, d) целесообразно различать штампованные детали высокой технологичности – до 100 мм, средней от 100 до 500 мм, низкой – свыше 500 мм.

Весьма важным показателем ТКИ является относительная высота H_D, от которой зависит количество вытяжных операций, а следовательно, трудоемкость и себестоимость изготовления детали. Для цилиндрической заготовки с плоским дном и малым радиусом сопряжения $(r/s \cong 1{,}0)$ можно принять следующие уровни ТКИ: менее 0,45 – высокая; 0,45…0,90 – средняя; более 0,90 – низкая. Деталь высокой технологичности может быть вытянута за одну операцию, средней технологичности – за одну–две операции, низкой технологичности – за три и большее число операций.

Для цилиндрической заготовки с плоским дном и большим радиусом сопряжения $(2r_c/d = 0{,}55...0{,}63)$ уровни ТКИ соответствуют следующим интервалам значений H/d : менее 0,70 – высокая; 0,70…1,20 – средняя; более 1,20 – низкая.

Степень геометрической сложности штампуемой детали устанавливается не только соотношениями размеров, но и допускаемыми отклонениями на форму и размеры детали, определяющие ее качество. Ужесточение отклонений требует введения дополнительных операций калибровки и шлифования, что увеличивает трудоемкость и себестоимость, а следовательно, снижает ТКИ.

При вытяжке устанавливают допускаемые отклонения на наружный диаметр, толщину стенки, разностенность. В табл. 7.5 даны рекомендации по оценке ТКИ по указанным параметрам.

Таблица 7.5

Рекомендуемые уровни технологичности деталей, изготавливаемых вытяжкой

Уровни ТКИ	Показатели ТКИ, %					
	δ_d	$\delta_{Sпр}$	$\delta_{Sпп}$	$\delta_{огр}$	$\delta_к$	$\delta_н$
Низкий	Менее 0,10	Менее 7,0	Менее 1,5	Менее 0,06	Менее 0,5	Менее 5,0
Средний	0,10…0,25	7,0…20,0	1,5…6,0	0,06…0,14	0,5…1,0	5,0…10,0
Высокий	Более 0,25	Более 20,0	Более 6,0	Более 0,14	Более 1,0	Более 10,0

Принятые в таблице обозначения: $\delta_d = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d} 100\%$; $\delta_{S\,\text{пр}} = \frac{S_{\text{в}} - S_{\text{н}}}{S} 100\%$; $\delta_{S\text{ï}} = \frac{S_{\text{âï}} - S_{\text{ô}}}{S} 100\%$; $\delta_{\text{огр}} = \frac{d^{\text{кр}}{}_{\max} - d^{\text{кр}}{}_{\min}}{2d} 100\%$; $\delta_{\text{к}} = \frac{d^{\text{в}} - d^{\text{н}}}{d} 100\%$; $\delta_{\text{н}} = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H} 100\%$; $d_{\max}$, $d_{\min}$, d – максимальный, минимальный и номинальный диаметры: $S^{\text{в}}$, $S^{\text{н}}$, $S_{\text{вп}}$, $S_{\text{ф}}$, $S_{\max}$, $S_{\min}$, S – толщины стенок в верхнем и нижнем расчетных сечениях, по впадине и фестону, максимальная, минимальная и номинальная соответственно; $d^{\text{кр}}{}_{\max}, d^{\text{кр}}{}_{\min}$ – максимальный и минимальный диаметры в зоне кромки; d^{B}, d^{H} – диаметры в верхнем и нижнем расчетных сечениях; $H_{\max}, H_{\min}, H$ – максимальная, минимальная и номинальная высоты детали.

7.6. Контроль и обеспечение качества штампуемых деталей

Контроль качества штампуемых заготовок и деталей выполняется как с целью исключить технологические отказы, так и с целью удалить из потока бракованные детали.

Детали, изготавливаемые вытяжкой, контролируются по наиболее существенным признакам: по отклонению формы, размерам, заданными чертежом и технологическими картами (операционными и технического контроля), по наличию местных дефектов.

Отклонением формы называется отклонение формы реальной (действительной) поверхности или реального профиля от формы номинальной геометрической поверхности или геометрического профиля.

Для оценки отклонения формы деталей, получаемых вытяжкой, применяют единичные показатели, характеризующие однопараметрические (элементарные) отклонения (см. табл. 7.5): разнотолщинность $\delta_{S\text{пр}}$, $\delta_{S\text{пп}}$, в том числе разностенность δ_S, разновысотность δ_H (в том числе косина), овальность δ_d, огранка $\delta_{\text{огр}}$, конусность $\delta_{\text{к}}$. Оценка качества деталей по форме может производиться по регламентированным стандартами (ГОСТами, стандартами предприятия СТП) значениям предельных отклонений формы и степеням точности, а также по допускам, определяемым техническими требованиями. Основные контролируемые размеры деталей – наружные диаметры и толщины стенок. Контроль дефектов в основном предполагает выявление внешних дефектов визуальным методом.

В зависимости от степени влияния дефекта на технологические и эксплуатационные свойства заготовки и детали различают дефекты критические (например, трещины), при наличии которых дальнейшее их деформирование

невозможно, а также значительные (например, утонение) и малозначительные (например, неглубокие царапины).

По происхождению различают дефекты металлургические, возникающие при отливке и прокатке металла (раковины, трещины, расслоения, пористость, плены, закаты, волосовины, рябизна, неплотности приварки томпака в биметалле, окисления, отслоения металла и др.) и технологические, характерные для процесса вытяжки (складки, продольные и поперечные трещины, царапины, надрывы, заусенцы, задиры).

7.7. Технологические расчеты

7.7.1. Исходные данные и последовательность расчетов

Исходные данные для технологических расчетов:

- чертеж готовой детали;
- принятый технологический маршрут изготовления детали и технологические схемы процессов вытяжки;
- механические свойства материала заготовки ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_в$ ε_{iy});
- значения предельных $m_{пр}$ и допустимых $m_{доп}$ коэффициентов вытяжки;
- режимы термической и химической обработки заготовок;
- рекомендации по технологическим покрытиям и смазкам.

Технологические расчеты выполняются в следующей последовательности:

1) определение размеров конечной штампованной заготовки (после последней вытяжки);

2) оценка и обеспечение, при необходимости, технологичности конструкции конечной штампованной заготовки;

3) расчет размеров исходной заготовки;

4) расчет количества вытяжных операций;

5) расчет размеров заготовок на промежуточных операциях;

6) расчет исполнительных размеров рабочего инструмента;

7) расчет технологических усилий.

7.7.2. Расчет размеров заготовок

Выделяют расчет размеров конечной штампованной заготовки, размеров исходной плоской заготовки, размеров заготовок после выполнения промежуточных вытяжных операций.

Расчет размеров конечной заготовки. Исходные данные для расчета размеров конечной заготовки: чертеж готовой детали (рис. 7.18,*а*); принятые маршрутный технологический процесс изготовления детали и технологиче-

ские схемы вытяжки; рекомендуемые припуски на обрезку; технологические требования, предъявляемые процессом вытяжки к конструкции деталей.

Расчетные размеры – номинальные размеры (рис. 7.18,*б*): наружный диаметр заготовки d_n; толщина стенки S_n; радиус сопряжения r_n; высота заготовки H_n. Толщина дна $S^д$ в расчетах предполагается равной толщине стенки конечной заготовки. В общем случае номинальные размеры конечной заготовки в любом расчетном сечении определяются в зависимости от размеров готовой детали в этом же сечении с учетом припусков на возможную механическую обработку, а также возможного изменения размеров на последующих штамповочных операциях другого вида:

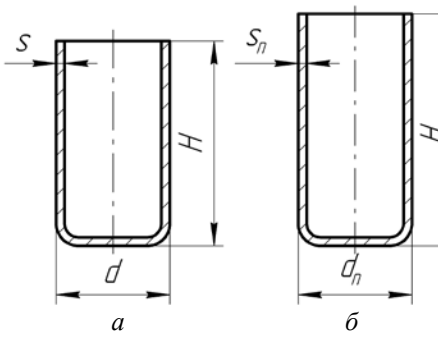


Рис. 7.18. Эскизы детали (*а*) и штампованной (*б*) заготовки

$$d_i^j = \left(d^j C_d^j + 2\ddot{I}_i^j\right);\ \ S_i^j = \left(S^j C_S^j + \ddot{I}_i^j\right);$$
$$H_i = \left(HC_H + \Delta H\right);\ \ r_{i\,j} \ge r; \qquad (7.32)$$

где $\ddot{I}_i^j$ – односторонний припуск на механическую обработку по наружной и (или) внутренней поверхностям; C_d^j, C_S^j, C_H – поправочные коэффициенты, учитывающие соответствующее изменение размеров конечной вытянутой заготовки на последующих штамповочных операциях другого вида; ΔH – припуск на обрезку.

Поправочные коэффициенты C_d^j, C_S^j, C_H устанавливаются по теоретическим или эмпирическим формулам с учетом вида применяемой последующей операции (обжима, раздачи, отбортовки и др.) и вида деформированного состояния заготовки в зоне ОПД на этой операции. Так, например, при последующем обжиме наружный диаметр вытянутой заготовки уменьшается, а стенка утолщается. Следовательно, для этого случая в соответствии с анализом деформированного состояния коэффициенты примут следующие значения: $C_d^j = 1/m_{i\acute{a}}^j > 1$; $C_S^j = \sqrt{m_{i\acute{a}}^j} < 1$, где $m_{i\acute{a}}^j = d/d_n$ – коэффициент обжима, обеспечивающий получение из вытянутой заготовки диаметром $d_п$ готовой детали диаметром d.

При отсутствии в технологическом маршруте последующих штамповочных операций другого вида коэффициенты C_d^j, C_S^j, C_H в формулах (7.32) принимаются равными единице, т.е. $C_d^j = C_S^j = C_H = 1$.

Припуски на обрезку неровной (волнистой) кромки зависят от относительной высоты и толщины вытягиваемой заготовки. Экспериментально установлено, что отношение $\Delta H / H_{\text{п}}$ для цилиндрических деталей составляет от 0,05 до 0,2, при этом верхние значения соответствуют большим абсолютным и относительным высотам $H_{\text{п}} / d_{\text{п}}$.

После определения размеров конечной для вытяжки заготовки необходимо оценить технологичность ее конструкции в соответствии и с учетом технологических требований, изложенных в подразд. 7.5. При несоответствии значений *конструктивно*-технологических параметров деталей уровням высокой и средней технологичности целесообразно откорректировать по согласованию с конструктором их значения, руководствуясь рекомендациями справочных материалов, и (или) предусмотреть в технологическом маршруте дополнительные, например калибровочные операции, обеспечивающие на выходе из технологического процесса заданные требования к детали.

Расчет размеров исходной заготовки. Исходные данные для расчета:

- размеры конечной штамповочной заготовки (после последней вытяжки);
- вид исходной заготовки и ее заданный базовый размер;
- припуски на обрезку на промежуточных операциях (между вытяжками).

Вид заготовки определен принятой маршрутной технологией. Заготовки могут быть плоскими с различной формой в плане (круг, квадрат, шестигранник) и полыми пространственной формы. Припуски на промежуточную обрезку назначаются из тех же соображений, что и после последней вытяжки при изготовлении конечной заготовки.

При применении плоской заготовки за базовый размер принимается ее толщина S_0. Она определяется в зависимости от толщины конечной штампованной заготовки в заданном контрольном сечении j (в стенке или дне), в общем случае, с учетом возможного изменения на промежуточных операциях и отличия от стандартной толщины полосы (ленты),

$$S_0 = C_{S0}^{j} \cdot S_{\text{п}}^{j}, \tag{7.33}$$

где C_{S0}^{j} – поправочный коэффициент ($C_{S0}^{j} \geq 1{,}0$).

Основу алгоритма составляет условие равенства объемов исходной и конечной штампованной заготовок:

$$V_0 = V_{\text{п}} + V_{\text{отх}}, \tag{7.34}$$

где V_0, $V_{\text{п}}$, $V_{\text{отх}}$ – объемы исходной, конечной заготовок и возможных отходов различного вида на промежуточных операциях (на обрезку, механическую обработку, угар, вытравливание и др.).

Из этого равенства вытекает другое, определяющее коэффициент использования металла (КИМ) $\eta_п$:

$$\eta_п = \frac{V_п}{V_0} = 1 - \frac{V_{отх}}{V_0}. \qquad (7.35)$$

При принятии допущения о неизменяемости толщины заготовки в процессе вытяжки, т.е. $S_0 = S^j{}_n$. вместо (7.35) можно записать:

$$\eta_п = \frac{F_п}{F_0} = 1 - \frac{F_{отх}}{F_0}, \qquad (7.36)$$

где $F_п$, F_0, $F_{îòõ}$ – площади поверхностей конечной штампованной и исходной заготовок и элементов, удаляемых в отход.

Так же как при расчете объемов, площади поверхностей могут определяться двумя способами: по суммированию площадей поверхностей элементарных фигур, в совокупности составляющих конструкцию конечной штампованной заготовки, и путем вычисления поверхности тела, образованной вращением вокруг оси ординат фигуры, ограниченной профилем образующей этого тела.

В уравнениях (7.35) и (7.36) объем и поверхность конечной заготовки определяют суммированием объема и поверхностей элементарных фигур на которые разбиваются чертеж конечной заготовки:

$$V_п = \sum_{i=1}^{N} V_{Ni}, \qquad (7.37а)$$

или

$$F_п = \sum_{i=1}^{N} F_{Ni}, \qquad (7.37б)$$

где V_{Ni}, F_{Ni} – объемы и площадь поверхности i-й элементарной фигуры; N – количество выделенных фигур.

Также расчет $V_п$, $F_п$ может быть выполнен путем вычисления поверхности образованной вращением вокруг оси ординат фигуры, ограниченной профилем образующей этого тела в соответствии с теоремами Гюльдена.

Для нахождения поверхностей выделяемых геометрических фигур используют известные из справочной литературы формулы. Точность вычисляемых этим способом площадей поверхностей заготовок будет определяться степенью соответствия выделяемых геометрических фигур конструкции тела, а также правомерностью принятого допущения о неизменяемости толщины стенки заготовки в процессе штамповки. Это допущение не является строгим, так как в процессе вытяжки на отдельных участках заготовки может происходить утолщение (краевая часть), а на других – утонение (на радиусных уча-

стках) стенок, что в свою очередь вызывает уменьшение и, соответственно, увеличение площади поверхности отштампованной заготовки по сравнению с ее значением для исходной заготовки. Для компенсации этого несоответствия $F_{\text{ï}}$ и F_0 в равенство (7.36) иногда вводится коэффициент, т.е.

$$F_0 = \frac{F_{\text{п}}\beta}{\eta_{\text{п}}}. \tag{7.38}$$

В частности, этот коэффициент можно определить по эмпирической формуле Л.А. Шофмана:

$$\beta = \frac{1}{\left[0{,}95 + \dfrac{0{,}8f}{r_{\text{м}}/S_0}\dfrac{1}{m^2}\right]}. \tag{7.39}$$

В зависимости от соотношения параметров f, $r_{\text{м}}/S_0$, m, входящих в формулу, коэффициент β может быть больше, меньше или равен единице. Это объясняется изменением соотношения меридиональных растягивающих (σ_ρ) и тангенциальных сжимающих (σ_θ) напряжений.

Для полых цилиндрических деталей исходная заготовка, чаще всего имеет форму круга, а поэтому из (7.38) следует:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4}{\pi}\frac{F_{\text{п}}}{\eta_{\text{п}}\beta}} \cong 1{,}13\sqrt{\frac{F_{\text{п}}}{\eta_{\text{п}}\beta}}. \tag{7.40}$$

Определение диаметра исходной заготовки по второму способу (применяется при штамповке деталей сложной формы) производится с использованием 1-й теоремы Гюльдена

$$F_{\text{п}} = L_{\text{п}} 2\pi \cdot Y_{cn} \tag{7.41а}$$

и ее варианта

$$F_{\text{п}} = 2\pi\sum_{i=1}^{n} l_i Y_{c\,i,} \tag{7.41б}$$

где $L_{\text{ï}}$ – длина образующей заготовки; $Y_{c\ddot{\text{i}}}$ – расстояние от оси детали до центра массы образующей; l_i, $Y_{c\,i}$ – длина i-го прямолинейного отрезка малой длины и расстояние его центра массы, лежащего на самом отрезке, до оси заготовки; n – количество прямолинейных отрезков малой длины, на которые разбивается образующая заготовки. При выборе коэффициента использования материала в формулах (7.38), (7.40) необходимо учитывать припуск на обрезку волнистой кромки вытянутой заготовки (детали), которая образуется вследствие плоскостной анизотропии структуры и механических свойств материала исходной заготовки. Выпуклые участки кромки называют фестонами, их высота может достигать до 20% высоты детали. Фестоны располагаются на участках кромки детали симметрично относительно направления прокатки.

7.7.3. Расчет количества вытяжных операций

Расчет количества операций производится с использованием основных условий ограничения деформации, действующих в процессах вытяжки без утонения: потери устойчивости, сопровождающейся образованием складок; потери устойчивости сопровождающейся локализацией деформации в опасном сечении заготовки с последующим разрушением [4].

К исходным данным относятся чертежи исходной и конечной заготовок, предполагаемый технологический маршрут изготовления конечной штампованной заготовки, математическая модель многооперационного процесса вытяжки без утонения в виде следующей системы определяющих уравнений:

1) коэффициент накопленной (суммарной) деформации

$$m_{\Sigma} = \frac{d_{\text{ï}}}{D_0} = \ddot{I}_{i=1}^{n} m_i ; \tag{7.42}$$

2) коэффициент вытяжки на любой *i*-й операции

$$m_i = \frac{d_i}{d_{i-1}} \geq m_{i\text{äîï}} ; \tag{7.43}$$

3) количество операций

$$n = \lim_{m_i \to m_{i\text{äîï}}} \frac{m_{\Sigma}}{m_i}; \tag{7.44}$$

4) допустимый коэффициент вытяжки (справочная величина)

$$m_{i\text{äîï}} \geq \hat{E}_{mi} m_{i\text{ïð}} ; \tag{7.45}$$

5) предельный коэффициент вытяжки (справочная величина)

$$m_{i\,\text{пр}} = f\left(\frac{S_{i-1}}{d_{i-1}}, \frac{r_{\text{м}i}}{S_0}, \frac{r_{\text{п}i}}{S_0}, \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{\text{в}}}, \eta, q_{\text{пр}}, f\right); \tag{7.46}$$

6) условие упругопластической устойчивости второго вида

$$\frac{S_0}{D_0} 100 \geq 4{,}5...5{,}5\left(1 - m_1\right) \tag{7.47а}$$

или:

- на первой вытяжке (при m_1<0,92)

$$\frac{S_0}{D_0} \geq \frac{\left(1{,}0 - 1{,}09 m_1\right)}{1{,}07\left(5{,}5 + \frac{r_{\text{м}}}{S_0}\right)}; \tag{7.47б}$$

• на последующей вытяжке

$$\frac{S_{i-1}}{d_{i-1}}100 \geq 5...7\left(1-m_i\right); \tag{7.48}$$

7) условие устойчивости пластического деформирования третьего вида

$$\sigma_{\rho\max} \leq \left[\sigma_\rho\right] = \frac{\left(\sigma_{iy}\right)_в}{K_\sigma}, \tag{7.49}$$

где $\left(\sigma_{iy}\right)_в = A \cdot e_{iy}{}^n$; $A = \frac{\sigma_{iy}}{\varepsilon_{iy}{}^n}$; $e_{iy} = \frac{2n\sqrt{1+m^2{}_\sigma} - m_\sigma}{2-m_\sigma}$; $m_\sigma = 0{,}6...0{,}7$;

$K_\sigma = (1{,}12...1{,}14)^n$; $\sigma_{\rho\max}$ по уравнениям (7.3), (7.8), (7.9) и (7.10);

8) рекомендуемые соотношения между коэффициентами вытяжки по операциям:

$$m_1 < m_2 \leq m_3 \leq ...m_i \leq ...m_{n-1} \leq m_n, \tag{7.50}$$

где $K_{mi} > 1-$ коэффициент запаса; $(\sigma_{iy})_в$ – интенсивность напряженного состояния в момент потери устойчивости при вытяжке; σ_{iy}, ε_{iy} – интенсивность напряжений и интенсивность деформации в момент потери устойчивости (образования «шейки») при испытании образцов на растяжение.

Алгоритм расчета количества операций с использованием математической модели (7.42)–(7.46) приведен на рис. 7.19.

На основании выполненных расчетов определяют диаметры заготовок на каждой из операций:

$$d_i = m_i d_{i-1}. \tag{7.51}$$

Радиусы сопряжения стенки и дна должны удовлетворять следующим соотношениям:

$$r_i = r_{i-1} - \Delta r_i, \;\; \Delta r_i = \frac{r_1 - r_n}{n-1}, \tag{7.52}$$

где r_1, r_n – радиусы сопряжения стенки и дна на первой и последней операциях.

Высоты заготовок рассчитывают из условия равенства площадей поверхностей до и после вытяжки с учетом припусков на обрезку кромок.

7.7.4. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента

Исходные данные для расчета исполнительных размеров рабочего инструмента:

• номинальные размеры заготовок после выполнения каждой из операций;

• допускаемые отклонения на неточность изготовления этих заготовок;

• припуски на возможный износ рабочего инструмента;

• допуски на возможную упругую деформацию рабочего инструмента и упругую разгрузку штампуемой детали.

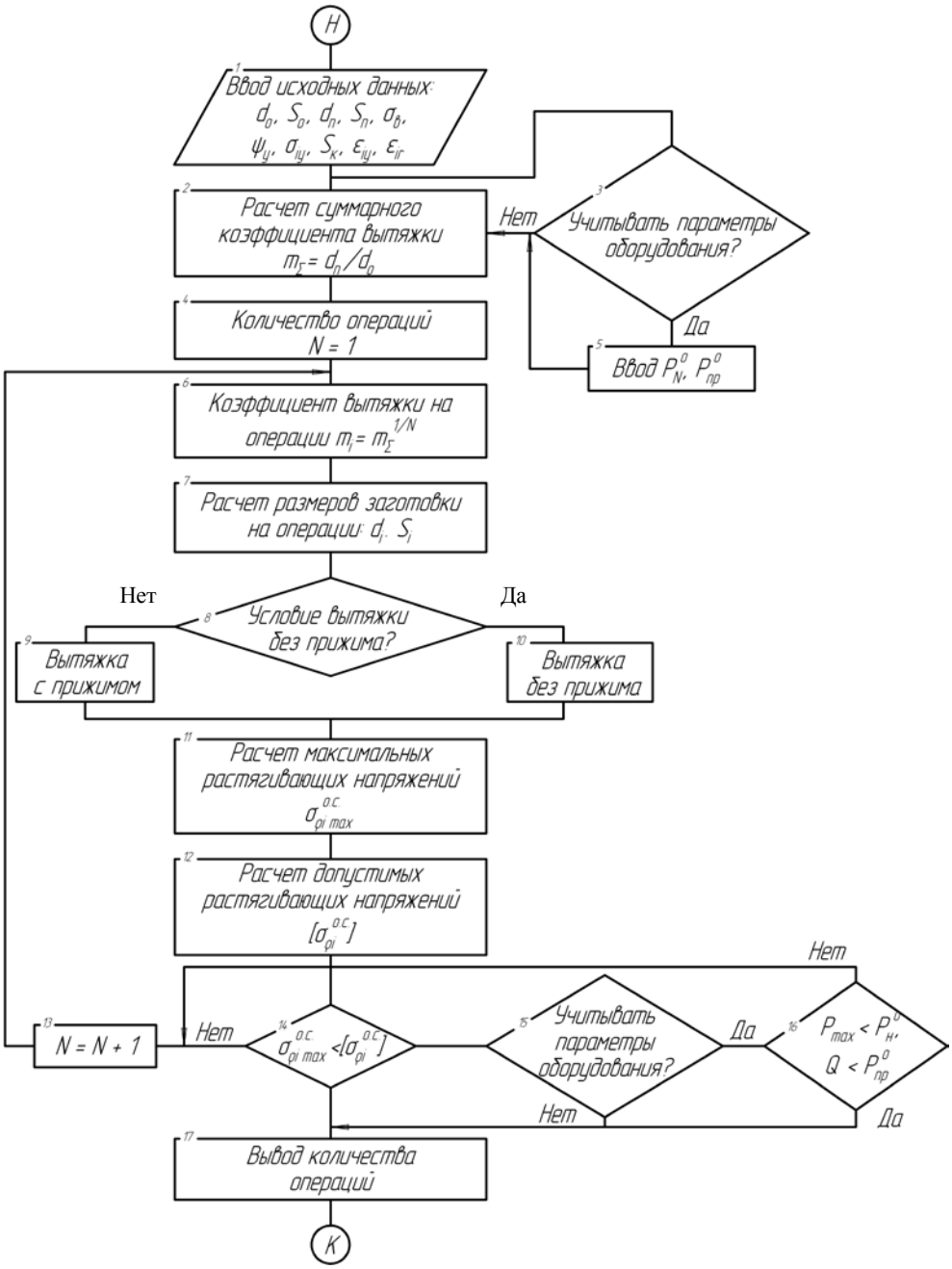
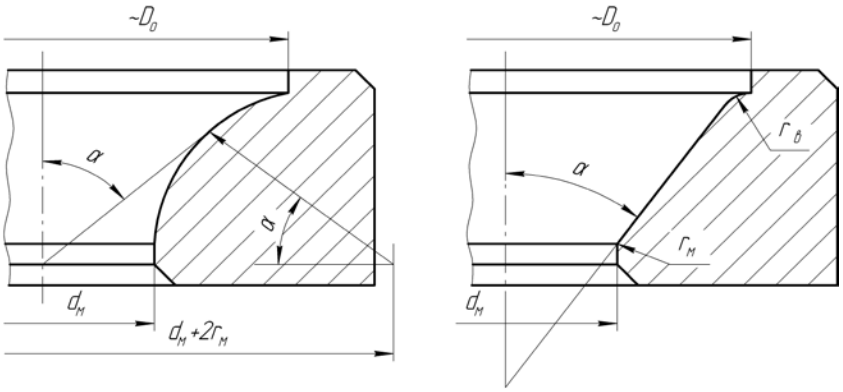


Рис. 7.19. Блок-схема алгоритма расчета количества вытяжных операций

Рабочий инструмент – пуансон и матрица (рис. 7.20).



а *б*

Рис. 7.20. Эскизы матриц для вытяжки: *а* – радиальная; *б* – коническая

За расчетный размер матрицы принимается ее минимальный диаметр: $d_м = d_{мmin}$. В общем случае с учетом перечисленных выше исходных данных можно записать

$$d_{ì} = d_{ì\ min} = d_{ì\ max} - Ï_{\text{èì}} - \delta_{\text{ôì}} - Ò_{ì}, \qquad (7.53)$$

где $d_{ì\ max}$ – максимальный диаметр матрицы; $Ï_{\text{èì}}$ – припуск на износ матрицы; $\delta_{\text{ôì}}$ – допуск на упругую деформацию матрицы; $Ò_{ì}$ – допускаемое отклонение на неточность изготовления матрицы.

Максимальный диаметр матрицы назначаем равным максимально допустимому с учетом упругой разгрузки диаметру детали, т.е. $d_{ì\ max} = d_{ä\,max} - \delta_{\text{óä}}$, где $d_{ä\,max} = d + T_{\text{äâ}}$; $d_{м\,max}$ – номинальный размер детали; $T_{\text{äâ}}$ – верхнее допускаемое отклонение на размер детали; $\delta_{уд}$ – величина упругой разгрузки детали.

Окончательно запишем

$$d_м = (d + T_{дв} - П_{им} - \delta_у - T_м), \qquad (7.54)$$

где $\delta_у = \delta_{ум} + \delta_{уд}$.

Полный учет всех составляющих необходим при расчете исполнительных размеров матриц на последних операциях при жестких требованиях, предъявляемых к штампуемой детали по точности. Припуск на износ матрицы в этом случае можно принимать по соотношению

$$Ï_{\text{èì}} = (0{,}8...1{,}0)Ï_{ä}, \qquad (7.55)$$

где $Ï_{ä} = Ò_{\text{äâ}} - Ò_{\text{äí}}$ – поле допуска; $Ò_{\text{äí}}$ – нижнее допускаемое отклонение на размер детали.

При низких требованиях по точности изготавливаемых заготовок (деталей) и легких условиях работы инструмента (отсутствие нагрева, невысоких усилиях) и на промежуточных вытяжных операциях размеры матриц могут назначаться по номинальным размерам штампуемых заготовок с учетом допусков на точность изготовления рабочего инструмента:

$$d_м = d^{+Т_м}. \tag{7.56}$$

Размеры пуансонов определяются по соответствующим размерам матриц с учетом принятых односторонних технологических зазоров z и допусков на неточность изготовления пуансонов, т.е.

$$d_п = (d_м - 2z)_{-T_п}. \tag{7.57}$$

Для приближенных расчетов можно принять

$$z_i = S_i^{кр} = S_{i-1}^{кр} \Big/ \sqrt{m_i},$$

где $S_i^{кр}$, $S_{i-1}^{кр}$ – толщина кромки штампуемой детали до и после вытяжки.

7.7.5. Расчет технологических усилий

Исходные данные: размеры заготовок по операциям, максимальные меридиональные растягивающие напряжения.

Максимальные усилия вытяжки рассчитываются по формуле

$$P_{\max i} = \pi(d_i - S_i)S_i \cdot \sigma_{\rho i \max}, \tag{7.58}$$

где d_i – наружный диаметр заготовки; $S_i \cong S_o$ – толщина стенки заготовки на данной операции; $\sigma_{\rho i \max}$ – максимальное значение растягивающего напряжения в цилиндрической части заготовки на данной i-й вытяжной операции (7.3), (7.8), (7.9), (7.10).

Отсюда следует, что на величину максимального усилия влияют те же технологические факторы, которые влияют на растягивающее напряжение и поперечные габаритные размеры детали.

Библиографический список

1. *Агеев Н.П.,* Данилин Г.А., Огородников В.П. Вытяжка в штампах полых тонкостенных деталях машино- и приборостроения. В двух частях. Ч. 1. Механические основы процесса вытяжки. Тверь: Изд-во ГЕРС, 1997. 336 с.

2. *Попов Е.А*. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.

3. *Агеев Н.П.,* Данилин Г.А., Огородников В.П. Технология производства патронов стрелкового оружия. Ч. 2. Процессы штамповки / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2007. 533 с.

4. *Агеев Н.П.,* Данилин Г.А., Огородников В.П. Вытяжка в штампах полых тонкостенных деталях машино- и приборостроения. В двух частях. Ч. 2. Проектирование технологических процессов. Тверь: Изд-во ГЕРС, 1998. 256 с.

8. ВЫТЯЖКА С УТОНЕНИЕМ

8.1. Способы вытяжки

Вытяжка с утонением, в соответствии с классификацией, приведенной в разд. 5, относится к классу толстолистовой штамповки и представляет собой процесс формообразования полой детали преимущественно путём принудительного утонения стенки заготовки при незначительном изменении её внутреннего диаметра при протягивании заготовки через одну или несколько матриц. Применяется главным образом как последующая операция формообразования полых заготовок, полученных каким-либо способом металлообработки (вытяжкой без утонения, свёрткой, выдавливанием, комбинированным процессом свертки с выдавливанием и т.д.). Поэтому исходной заготовкой здесь служит полая деталь с дном цилиндрической, конической или призматической формы с тонкими по отношению к поперечным размерам стенками постоянной или переменной толщины. В общей классификации способов штамповки можно выделить следующие основные способы вытяжки с утонением, применяемые в производстве:

- по форме исходной заготовки и штампуемой детали – вытяжку осесимметричных и неосесимметричных деталей с переменной толщиной стенки, ступенчатую и бесступенчатую;
- по виду движения заготовки и рабочего инструмента – вытяжку в штампах при поступательном движении рабочего инструмента, вытяжку в качающихся матрицах, ротационную вытяжку;
- по схеме приложения дополнительных сил – вытяжку без приложения дополнительных сил, с приложением дополнительных сил (подпора, противодавления);
- по температурным условиям – вытяжку без нагрева заготовки и с нагревом вне штампа;
- по скоростным условиям – статическую вытяжку, скоростную и высокоскоростную;
- по условиям трения – вытяжку с граничным и жидкостным трением при реализации смешанной схемы действия сил трения (активных и пассивных);
- по количеству матриц – вытяжку через одну или несколько матриц;
- по типу технологической оснастки и оборудования – вытяжку в штампах на прессах, вытяжку в инструментальных штамповых блоках на автоматических роторных машинах и роторно-конвеерных линиях (АРЛ и РКЛ), вытяжку на станках для ротационной обработки.

В патронном производстве преимущественно применяют вытяжку в штампах на прессах и инструментальных блоках, на АРЛ и РКЛ через одну и (или) две матрицы из колпачков, полученных свёрткой с утонением, без их нагрева, в условиях статической и скоростной штамповки.

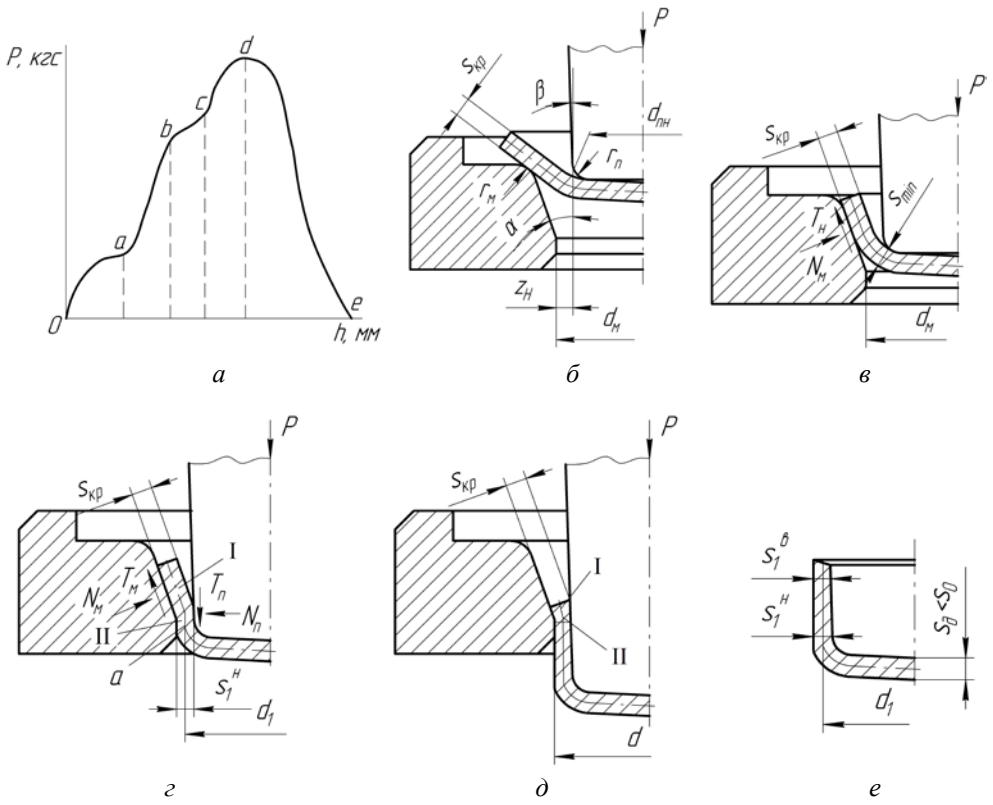
8.2. Свёртка

Вытяжка с утонением из плоской заготовки (свертка) осуществляется за счёт значительного принудительного уменьшения её диаметра и толщины.

Процесс вытяжки в одной матрице при $D_0 - d_{\text{п}}^{\text{н}}/2 \geq S_0$ (D_0, S_0 – диаметр и толщина исходной заготовки, $d_{\text{п}}^{\text{н}}$ – диаметр пуансона в нижнем расчётном сечении) делится на следующие характерные стадии (рис. 8.1):

1) пространственный изгиб с растяжением плоской заготовки вокруг кромки пуансона (рис. 8.1,*а*, участок кривой "*оа*", рис. 8.1,*б*);

2) вытяжка пространственной заготовки без принудительного утонения стенок (рис. 8.1,*а*, участок кривой "*ас*", рис. 8.1,*в*);



а *б* *в* *г* *д* *е*

Рис. 8.1. Технологическая схема процесса свертки: *а* – схема диаграммы "усилие–путь инструмента" $P - h$; *б–д* – первая–четвертая стадии процесса; *е* – эскиз готовой детали

3) вытяжка пространственной заготовки с принудительным утонением стенок (рис. 8.1,*а*, участок кривой "*cd*", рис. 8.1,*г*);

4) вытяжка пространственной заготовки с принудительным утонением кромки и формообразованием цилиндрической детали (рис. 8.1,*а*, участок кривой "*de*", рис. 8.1,*д*).

На первых стадиях осуществляется изменение кривизны срединной поверхности заготовки, значительное уменьшение диаметральных размеров и прилегание заготовки по наружной поверхности к матрице, утолщение кромки $S^{кр}$, не контролируемое зазором инструмента утонение дна и стенки в зоне вытяжной кромки пуансона S_{min}. При этом в стенках заготовки действуют в меридиональном направлении растягивающие напряжения, которые достигают своего максимального значения в месте сопряжения стенки и дна и в сочетании с тангенциальными растягивающими напряжениями образуют жесткую схему напряженного состояния в этом месте (опасном сечении). Вторая стадия определяет предельную степень деформации по изменению диаметра, т.е. предельный коэффициент вытяжки.

Третья стадия процесса характеризуется формированием очага интенсивной пластической деформации с принудительным утонением стенки исходной заготовки, определяемым величиной одностороннего зазора ($z^{н}/S_0 \le 1{,}0$). В зоне принудительного утонения стенки (зона II) наблюдается интенсивное деформационное упрочнение металла в опасном сечении, а на поверхности контакта заготовки с пуансоном возникает сила трения $T_{п}$, направленная в сторону движения пуансона, что в совокупности уменьшает растягивающие напряжения в опасном сечении (см. рис. 8.1,*г*). В конце этой стадии усилие деформирования достигает максимального значения. Третья стадия определяет предельную степень утонения стенки и суммарную по изменению ее диаметра и толщины предельную степень деформации.

Особенностью процесса во время протекания четвёртой стадии является интенсивное уменьшение объёма зоны принудительного утонения стенки II и резкий спад усилия деформирования.

При соблюдении условия $D_0 - d_{п}^{н}/2 \le S_0$ выделенные первые две стадии отсутствуют, вытяжка осуществляется сдвигом (рис. 8.2). В это м случае начальная стадия процесса завершается затеканием центральной части заготовки в цилиндрический поясок матрицы и возникновением сдвиговой деформации при максимальном усилии формоизменения (рис. 8.2,*а*, участок кривой "*оа*", рис. 8.2,*б*,*в*). Конечная стадия, так же как и в первом случае, соответствует перемещению торца пуансона от верхней кромки цилиндрического пояска матрицы до конца процесса (рис. 8.2,*а*, участок кривой "*ав*", рис. 8.2,*г*).

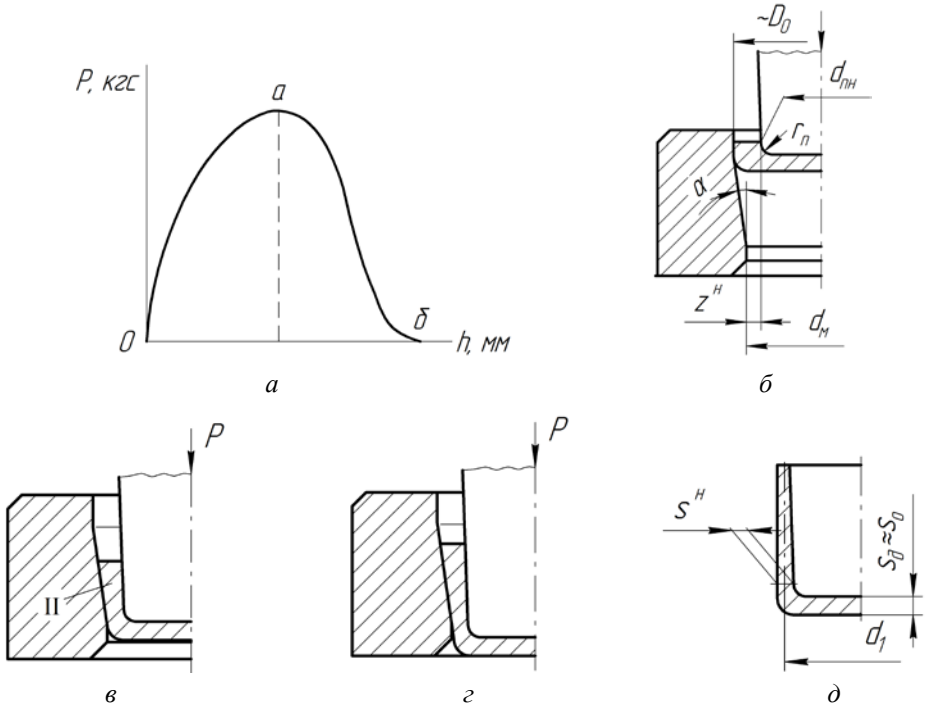


Рис. 8.2. Технологическая схема процесса свертки сдвигом: *а* – схема диаграммы “усилие – путь инструмента” $P - h$; *б*, *в* – начальные стадии процесса; *г* – конечная стадия; *д* – эскиз готовой детали

8.3. Вытяжка с утонением через одну матрицу

Вытяжка выполняется в конических матрицах пуансонами, имеющими слабую конусность (односторонний угол конусности β до 1°30′). Процесс вытяжки с утонением через одну матрицу имеет четыре существенно выраженных стадии (рис. 8.3): деформирование дна и придонного участка заготовки (*б*, *в*), деформирование стенки (*г*), деформирование краевой части заготовки (*д*). Первая, вторая и четвёртая стадии являются нестационарными, третья – стационарная, что даёт основание относить вытяжку с утонением к классу стационарных процессов. Первая стадия завершается при совмещении торца пуансона с входным сечением калибровочного цилиндрического пояска матрицы (в.с.п.), вторая – при совмещении нижнего расчётного сечения пуансона с в.с.п. Начало четвёртой, заключительной стадии может быть установлено по моменту совмещения кромки заготовки с начальным сечением геометрического очага деформации. При малой высоте вытягиваемой заго-

товки может отсутствовать выраженная третья, стационарная стадия. На рисунке показаны силы нормального давления $N_м$, $N_п$ и силы трения $T_м$, $T_п$, действующие на поверхностях контакта заготовки с матрицей и пуансоном. В осевом направлении на стенку заготовки действует, так называемое, «тянущее» усилие Q.

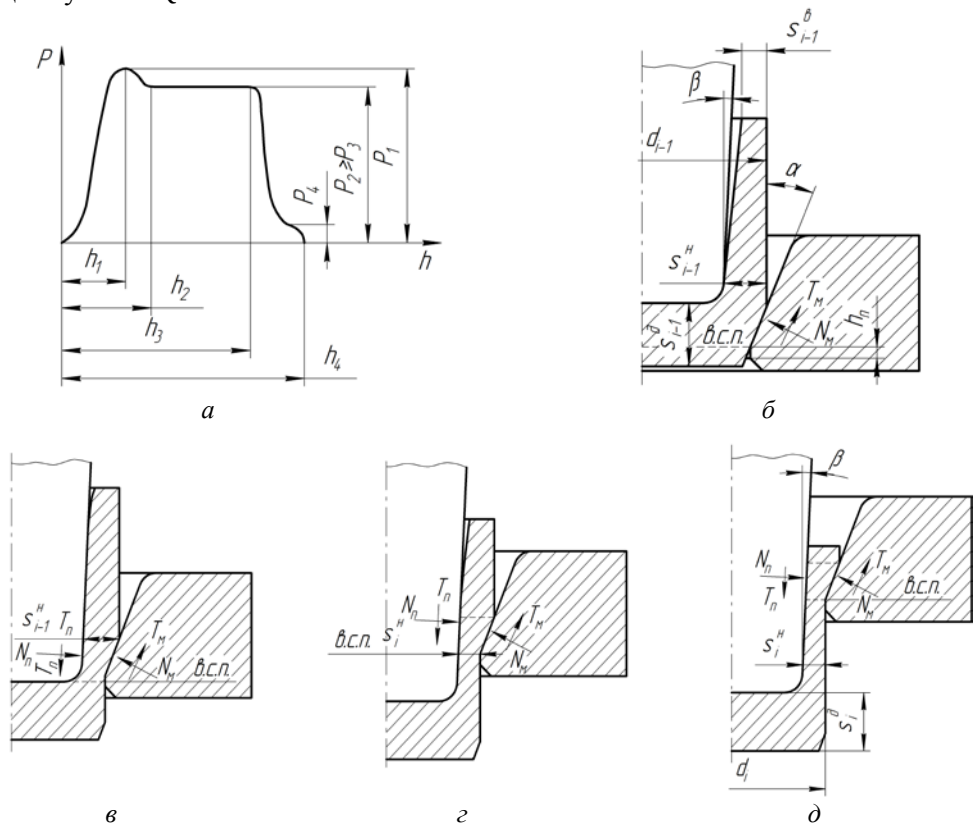


Рис. 8.3. Машинная диаграмма “усилие – путь инструмента” $P – h$ (*а*) и схема формоизменения заготовки по стадиям процесса вытяжки с утонением через одну матрицу (*б – д*)

Усилие деформирования P_1 (максимальное) соответствует первой стадии процесса, усилия P_2 и P_3 – началу и концу третьей, стационарной стадии процесса. В результате исследования установлено влияние на отмеченные характерные усилия и их отношения P_1/P_2, P_1/P_3 таких технологических факторов, как относительной толщины дна исходной заготовки S_{i-1}/d_{i-1}, угла конусности матрицы α, угла конусности дна заготовки γ (табл. 8.1).

Отмеченные особенности изменения технологического усилия при вытяжке объясняются значительным влиянием изменения формы, размеров ОПД, схемы НДС при переходе от первой к последующим стадиям процесса.

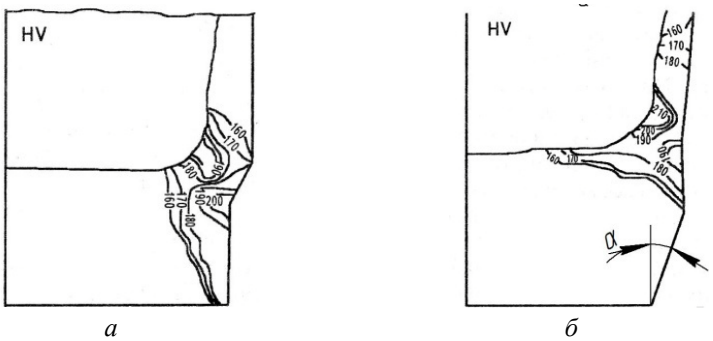
На форму и размеры ОПД существенно влияют геометрические параметры дна заготовки ($S^{д}_{i-1}/d_{i-1}$, γ) и рабочего инструмента (α), степень деформации e_i. С уменьшением α, γ, $S^{д}_{i-1}/d_{i-1}$ и увеличением e_i размеры ОПД в продольном и поперечном направлениях и, соответственно, его объем увеличиваются.

Таблица 8.1

Влияние угла конусности матрицы и дна исходной заготовки на усилие вытяжки с утонением (d_{i-1} = 43 мм; d_i = 39,6 мм)

Угол конусности		Силовые параметры процесса									
		При $S^{д}_{i-1}/d_{i-1}$ = 0,16					При $S^{д}_{i-1}/d_{i-1}$ = 0,32				
α	γ	P_1	P_2	P_3	P_1/P_2	P_1/P_3	P_1	P_2	P_3	P_1/P_2	P_1/P_3
			кН					кН			
5°	5°	128,1	66,0	54,4	2,1	2,7	142,5	71,8	59,4	1,9	2,3
	15°	127,6	67,7	56,1	1,9	2,2	124,3	54,2	46,2	2,2	2,5
	25°	111,7	64,4	56,1	1,8	2,0	128,2	54,5	34,6	2,5	3,5
15°	5°	128,7	59,4	47,8	2,2	2,7	148,5	70,1	56,1	2,2	2,7
	15°	121,1	60,2	49,5	2,1	2,5	126,5	60,3	47,8	2,1	2,5
	25°	120,5	59,4	49,5	2,1	2,5	121,5	57,7	44,5	2,1	2,7
25°	5°	145,2	60,2	49,5	2,4	3,0	158,9	74,3	56,1	2,1	2,8
	15°	128,2	55,3	49,5	2,3	2,6	132,0	63,5	44,6	2,1	2,7
	25°	120,4	54,4	52,8	2,2	2,3	117,2	58,6	41,3	1,9	2,5

Деформированное состояние и механические свойства (твердость) неоднородны по объему очага деформации (рис. 8.4). Области с наибольшими значениями интенсивности деформации ε_i и твердости *HV* формируются в зонах заготовки, контактирующих по наружной поверхности с матрицей, по внутренней – с радиусным участком пуансона, сопрягающимся с его торцем.



а *б*

Рис. 8.4. Распределение твердости *HV* по сечению толстодонной заготовки на первой и второй стадиях процесса: *а* – α=25°, γ=5°; *б* – α=5°, γ=15°

Эти зоны представляют локальные очаги деформации. В момент их слияния объем пластически деформированного металла и технологическое усилие достигают максимальных значений. В придонном участке заготовки может быть определено положение области максимального упрочнения. При некоторых условиях в этой области или на границе с ней возможно формирование опасного, с точки зрения разрушения, сечения в заготовке.

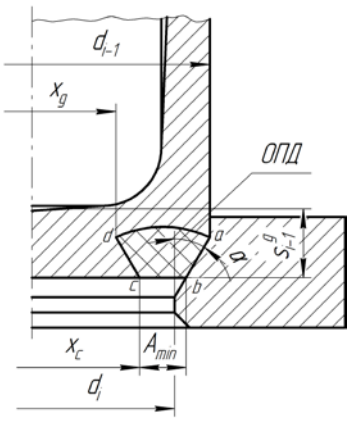


Рис. 8.5. Схема ОПД на первой стадии процесса вытяжки толстодонной заготовки

На рис. 8.5 показана схема формировния ОПД в донной части заготовки на первой стадии процесса.

С увеличением угла конусности α и относительной толщины дна заготовки $S^{д}_{i-1}/d_{i-1}$ размеры ОПД в поперечном сечении уменьшаются за счет локализации деформации в поверхностных слоях заготовки: $A_{\max} = d_{i-1}/2 - x_{\min}$; $A_{\min} = d_i/2 - x_{\max}$. При этом угол конусности дна штампуемой заготовки несущественно влияет на изменение размеров очага деформации. При больших относительных толщинах дна ($S^{д}_{i-1}/d_{i-1}$>0,2) ОПД охватывает не всю, а только периферийную часть дна заготовки.

Деформированное состояние заготовки на первой стадии соответствует сдвигу ($\nu_\varepsilon \cong 0$) . При уменьшении относительной толщины дна исходной заготовки ($S^{в}_{i-1}/d_{i-1} \le 0{,}2$) и малых углах конусности матрицы ($\alpha = 5°$) ОПД на первой стадии процесса охватывает всю донную часть.

Приближенное среднее по толщине дна значение поперечного размера $A_{ср}$ ОПД можно определить по эмпирической зависимости

$$A_{ср} = (A_{\max} - A_{\min})/2 = 0{,}25[2{,}6 - 0{,}3\alpha + 0{,}02\gamma - (1{,}25\ldots1{,}50)\cdot S^{д}_{i-1}/d_{i-1}], \quad (8.1)$$

где α, γ – односторонние углы конусности в градусах матрицы и дна заготовки соответственно ($\alpha = 5\ldots15°$, $\gamma = 5\ldots15°$); $S^{д}_{i-1}/d_{i-1}$ – относительная толщина дна исходной заготовки.

На второй стадии процесса в зоне придонного участка (зона «угла») формируется резко неоднородное деформированное состояние, соответствующее сдвигу.

С увеличением угла конусности дна заготовки размер ОПД на первой стадии в осевом направлении уменьшатся, т.е. ОПД смещается к зоне “угла”;

при этом характер распределения напряжений по сечению сохраняется прежним. При угле конусности дна заготовки, превышающем значения угла конусности матрицы ($\gamma = 25^{o} > \alpha = 15^{o}$), донная часть заготовки находится в просвете матрицы, на "весу", и лишь небольшая её часть деформируется. В этом случае первую стадию процесса можно не принимать во внимание. Изменение угла конусности дна заготовки практически не влияет на напряженное состояние придонного участка на второй стадии процесса.

Более существенно на напряженное состояние влияют угол конусности матрицы (при $\gamma \le \alpha$) и относительная толщина дна исходной заготовки $S^{д}_{i-1}/d_{i-1}$. Уменьшение угла конусности матрицы до $\alpha = 5^{o}$ по сравнению с $\alpha = 15^{o}$ влияет на расширение границ ОПД в радиальном направлении и «смягчает» схему напряженного состояния. Показатель жесткости K изменяется от –5,85 в центре дна заготовки до –2,03 на периферии, что свидетельствует о создании в ОПД схемы всестороннего неравномерного сжатия, присущего процессам объемной штамповки.

На второй стадии процесса в придонном участке заготовки также формируется более "мягкая" схема напряженного состояния ($-4{,}0 < K < -1{,}4$), что характеризует отсутствие растягивающих напряжений. Вид напряженного состояния изменяется от сдвига ($\nu_\sigma = -0{,}06$) на входе в ОПД до растяжения ($\nu_\sigma \approx -0{,}80$) на выходе из ОПД.

Увеличение угла конусности матрицы по сравнению с $\alpha = 15^{o}$ приводит к локализации деформации в приповерхностном слое заготовки и к некоторому повышению жесткости схемы напряженного состояния заготовки на первой и второй стадиях процесса.

Уменьшение относительной толщины дна исходной заготовки до значения 0,19 по сравнению с рассмотренным выше случаем деформирования толстодонной заготовки $S^{д}_{i-1}/d_{i-1} = 0{,}38$ при малых углах конусности матрицы и заготовки ($\alpha = \gamma = 5^{o}$) влияет на увеличение размеров ОПД. На первой стадии процесса пластическая деформация охватывает всю донную часть заготовки. Напряжения в дне распределены относительно равномерно ($\overline{\Delta\sigma_i} \approx 0{,}25$), интенсивность напряженного состояния возрастает от центра к периферии в интервале 511…570 МПа (сечение i=1). Характеристика вида напряженного состояния соответствует сдвигу ($\nu_\sigma = 0 \ldots -0{,}1$), а показатель жесткости изменяется в интервале $-2{,}51 \le K \le -0{,}85$. На второй стадии процесса уменьшение относительной толщины дна заготовки повышает «жесткость» схемы напряженного состояния в придонном участке ($-1{,}5 \le K \le -0{,}20$), вследствие чего в этой части заготовки появляются растягивающие напряжения σ_z.

Для расчета максимального усилия «толстодонных» заготовок можно использовать расчетную схему, представленную на рис. 8.6, и приближенные формулы (8.2) и (8.3).

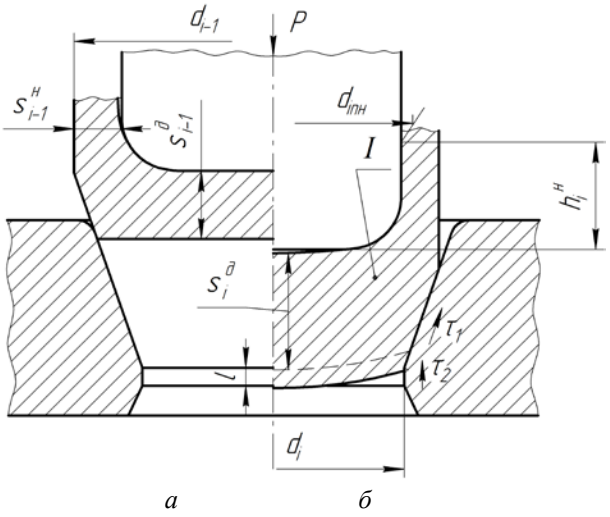


Рис. 8.6. Расчетная схема к определению усилия на первой стадии процесса вытяжки с утонением: *а*, *б* – начало и конец первой стадии

Среднее удельное усилие в зоне ОПД равно:

$$q = \sqrt{3}/2 \cdot \sigma_i \cdot \left(\varepsilon_{i\,\text{ср.д}}\right)\varepsilon_{i\,\text{ср.д}}[2{,}2(\cos\alpha - 1)^2 + f/\sin\alpha], \qquad (8.2)$$

где $\varepsilon_{i\text{ср.д}} = \frac{2}{\sqrt{3}}\ln\left(d_{i-1}/d_i\right)$ – средняя величина интенсивности деформации в очаге деформации.

Интенсивность напряжений σ_i определяется по аналитической аппроксимаций кривой упрочнения "$\sigma_i - \varepsilon_i$" в зависимости от величины $\varepsilon_{i\text{ср.д}}$. Максимальное усилие деформирования на первой стадии процесса будет равно:

$$P = qF_{i\text{п.н}}, \qquad (8.3)$$

где $F_{i\text{п.н}}$ – площадь нижнего расчетного сечения пуансона; $F_{i\,\text{п.н.}} = \pi/4 \cdot d^2_{\text{п.н.}}$.

Экспериментальная проверка формул (8.2) и (8.3) показала удовлетворительную сходимость расчетных и опытных значений усилий при $\alpha = 8^{\circ}..15^{\circ}$ при различной геометрии заготовок ($\gamma = 5°...25°$) и различных относительных толщинах дна заготовок ($S^{д}_{i-1}/d_{i-1} = 0{,}19\ldots0{,}40$): погрешность расчетов находится в пределах 5…15%. При малых углах конусности матриц ($\alpha \le 5°$) расчет по этим формулам дает завышение усилий на 25…30%, при больших углах конусности ($\alpha = 25°$) – занижение на 20…25%. Учитывая, что оптимальные углы конусности матриц при последующей вытяжке находятся в интервале 8° – 15°, формулы (8.2), (8.3) можно рекомендовать для технологических расчетов.

На стационарной стадии процесса вытяжки цилиндрической заготовки коническим пуансоном (с односторонним углом конусности β) происходит формообразование стенки с переменной по ее высоте толщиной преимущественно путем принудительного утонения стенки исходной заготовки. При этом практически не изменяется внутренний диаметр заготовки, но уменьшаются наружный и средний по толщине стенки диаметры и тем больше, чем больше ее относительная толщина $S_d^j = S_i^j/d_{i-1}$ (j – номер расчетного сечения).

Величина относительной тангенциальной деформации наружного слоя заготовки может быть определена по формуле

$$\varepsilon_{\theta H}^{j} = \frac{2\Delta S_i{}^{j}}{d_j{}^{i-1}}, \qquad (8.4)$$

где $\Delta S^j_i = S^j_{i-1} - S^j_i$ – абсолютное утонение стенки заготовки на i-й операции в расчетном сечении j. Эта деформация обычно не превышает 0,1, а средняя по толщине стенки тангенциальная деформация $\varepsilon_{\theta ср} < 0{,}05$.

В то же время тангенциальную деформацию внутреннего слоя заготовки $\varepsilon_{\theta вн}{}^{j}$ можно оценить из выражения

$$\varepsilon_{BH}{}^{j} = \frac{\Delta d_{Bi}{}^{j}}{d_{Bi-1}{}^{j}}, \qquad (8.5)$$

где $\Delta d^j_{Bi} = 2(h^j_i - h^j_{i-1})\mathrm{tg}\beta_i - 2z_i^j$ – величина изменения внутреннего диаметра; $z_i^j = (h^j_{i-1} - h^H_{i-1})\mathrm{tg}\beta_{i-1}$ – односторонний зазор на свободное вхождение пуансона в исходную заготовку; h^j_i, h^j_{i-1} – расстояния расчетного сечения j от внутренней поверхности дна заготовки; h^H_{i-1} – расстояние нижнего расчетного сечения от внутренней поверхности дна заготовки. Приведенное соотношение (8.5) свидетельствует о возможности появления положительной тангенциальной деформации ($\varepsilon_{\theta вн}{}^{j} > 0$) внутреннего слоя за счет вытяжки коническим пуансоном. Наибольшие деформации (радиальные ε_{ri}, осевые ε_{zi}, интенсивность деформации ε_{ii}) и растягивающие напряжения σ_{zi} возникают в стенке заготовки, в зоне ОПД.

Особенностями процесса деформации на этой стадии являются:

- постоянство формы и размеров ОПД;
- действие в ОПД значительных по величине сжимающих сил $N_П$, $N_М$ и напряжений в тангенциальном (σ_θ) и радиальном (σ_r) направлениях, растягивающих сил Q и напряжений σ_z в осевом направлении;
- действие в зоне ОПД сил контактного трения, направленных на поверхностях контакта заготовки с пуансоном $T_п$ в сторону его движения, а с матрицей $T_м$ – в обратном направлении и уменьшения тянущего усилия Q по сравнению с общим усилием вытяжки P ($Q = P - T_п$), а следовательно и растягивающих напряжений σ_z;

- деформированное состояние заготовки в зоне ОПД приближенно соответствует сдвигу ($\varepsilon_\varepsilon \cong 0$) ввиду малости тангенциальной деформации$\varepsilon_\theta \cong 0$, $\varepsilon_z = -\varepsilon_r,\ \varepsilon_i = -2/\sqrt{3} \cdot \varepsilon_r$);
- «опасное» сечение заготовки, в котором наиболее вероятно разрушение от действия максимальных растягивающих напряжений$\sigma_{z\max}$ с образованием поперечных трещин, располагается на выходе из ОПД, где толщина стенки заготовки будет наименьшей;
- за счет интенсивной пластической деформации металла заготовки в ОПД обеспечивается деформационное упрочнение стенки по всей ее высоте при наибольшем упрочнении в зоне кромки, где достигается наибольшая степень деформации ($e_{i\max}$);
- ввиду значительных сил контактного трения при интенсивной пластической деформации тонкостенных заготовок проявляется тепловой эффект деформации, сопровождающийся нагревом деформируемой заготовки до повышенных температур (до 100°С и выше), что требует применения интенсивного охлаждения СОЖ и специальных устройств (съемников) для снятия заготовок с пуансонов.

Для технологических расчетов и оптимизации процесса вытяжки необходимо иметь возможность качественной и количественной оценки влияния основных технологических факторов на напряженное состояние, технологические усилия, предельные до разрушения степени деформации. К основным технологическим факторам относятся:

- механические свойства материала исходной заготовки определяемые с учетом состояния материала (отожженный, наклепанный) ($\sigma_{0,2}, \varepsilon_{ip}$, кривая упрочнения материала «$\sigma_i - \varepsilon_i$»);
- степень предварительной деформации исходной заготовки e_{i0};
- степень деформации в верхней матрице e_{iB} при вытяжке через две матрицы;
- геометрия рабочего инструмента (односторонние углы конусности матрицы α и пуансона β);
- толщина стенки исходной заготовки S^B_{i-1};
- условия контактного трения ($f_п$, $f_м$ – коэффициенты трения на поверхности контакта заготовки с пуансоном и матрицей соответственно).

Математическая модель процесса деформации на стационарной стадии, предшествующей разрушению заготовки, описывается следующей системой уравнений [1]:

а) главные напряжения:

$$\sigma_z = b\,\sigma_i + \sigma_i\,(2K-3b)/6; \qquad (8.6)$$

$$\sigma_r = \sigma_i\,(2K-3b)/6; \qquad (8.7)$$

$$\sigma_\theta = 1/3\,K\,\sigma_i; \qquad (8.8)$$

б) интенсивность напряжений:

$$\sigma_i=(\sigma_i)_{\text{ПР}} - C_1\exp\text{-}(e_{i0}+e_{ip}) - C_2\exp - N\,(e_{i0}+ e_{ip}); \qquad (8.9)$$

в) коэффициент жесткости схемы напряженного состояния в ОПД:

$$K = -1{,}39\ln\frac{e_{ip}}{2\varepsilon_{ip}};\ \ b = \frac{2}{\sqrt{3}}; \qquad (8.10)$$

г) предельная до разрушения степень деформации:

$$e_{ip} = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i x_i + \sum_{i,\,j=1}^{n} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{n} b_{ii} x_i^2 \qquad (8.11)$$

– многофакторная модель предельной до разрушения степени деформации, получаемая при постановке планируемого эксперимента; b_0 – свободный член уравнения; b_i, b_{ij}, b_{ii} – коэффициенты регрессии, характеризующие соответственно линейные эффекты, эффекты взаимодействия и квадратичные эффекты; n – число входных переменных (технологических факторов); x_i (i = 1,2,3,4…n) – технологические факторы (e_{i0}, $e_{iв}$, α, β и др.); ε_{ip} – интенсивность предельной до разрушения деформации, определяемая по результатам механических испытаний образцов на растяжение (K=1), где e_{i0}, $e_{iв}$, α, β – степень предварительной деформации заготовки, степень деформации верхней матрицы, углы конусности инструмента.

При построении этой модели приняты следующие допущения:

1) процессы вытяжки протекают в условиях плоской деформации (ε_θ=0, ε_z = - ε_r, ν_ε = 0);

2) материал заготовки изотропный;

3) за главные направления приняты радиальные r, осевое z и окружное θ направления;

4) деформация по сечению заготовки однородна.

Величина ε_{ip} может быть определена с учетом предварительной степени деформации материала исходной заготовки, поступающей на вытяжку, путем введения аппроксимации $\varepsilon_{ip}(e_{i0})$ линейного вида, т.е.

$$\varepsilon_{i\text{p}} = A + Be_{i0}, \qquad (8.12)$$

где A, B – эмпирические коэффициенты.

Анализ влияния технологических факторов на напряженное состояние заготовки при вытяжке с утонением через одну матрицу выполним на примере стали 11ЮА с использованием моделей (8.6)…(8.10) и (8.13), (8.14):

$$\begin{aligned} e^*_{i\text{p}} &= 146{,}9 - 0{,}81e_{i\text{в}} - 0{,}73e_{i0} - 110{,}63\beta + 2{,}20\alpha - 0{,}0051e^2_{i\text{в}} + \\ &+ 0{,}0063e^2_{i0} + 64{,}66\beta^2 - 0{,}0607\alpha^2 - 0{,}10e_{i\text{в}}\beta + 0{,}0073e_{i\text{в}}\alpha + \\ &+ 0{,}0486e_{i0}\beta + 0{,}004e_{i0}\alpha - 0{,}84\beta\alpha \end{aligned} \qquad (8.13)$$

– для отожженного состояния материала;

$$e_{i\text{р}}^{*} = 130{,}5 - 0{,}44e_{i\text{в}} - 0{,}87e_{i0} - 65{,}41\beta + 1{,}53\alpha - 0{,}0066e_{i0}^{2} + \\ + 43{,}91\beta^{2} - 0{,}0316\alpha^{2} + 0{,}0012e_{i\text{в}}e_{i0} - 0{,}11e_{i\text{в}}\beta + 0{,}007e_{i\text{в}}\alpha + \\ + 0{,}0723e_{i0}\beta + 0{,}0086e_{i0}\alpha - 1{,}06\beta\alpha \qquad (8.14)$$

– для закалённого исходного состояния.

В соотношениях (8.10), (8.13), (8.14) при вытяжке через одну матрицу $e_{i\text{в}} = 0$, при отсутствии предварительного наклепа $e_{i0} = 0$. Для стали 11ЮА в отожженном состоянии в (8.12) $A = 0{,}89$, $B = -0{,}424$.

На основании анализа результатов расчета параметров напряженного состояния при вытяжке с утонением через одну матрицу по полученным выше моделям установлено следующее.

Коэффициент жесткости схемы напряженного состояния (его среднее интегральное значение) K в зоне разрушения, прилегающей к внутренней поверхности заготовки, изменяется в интервале $0{,}85 > K > -0{,}12$ в зависимости от степени предварительной деформации e_{i0} и геометрических параметров рабочего инструмента (α, β). Эти уровни изменения показателя K согласуются с уровнями, рассчитанными при применении метода линий скольжения и метода совместного решения приближенных уравнений равновесия и пластичности для внутреннего слоя заготовки. При этом отрицательные значения ($0 > K > -0{,}12$) отвечают случаю вытяжки предварительно сильно наклепанной заготовки ($e_{i0} = 0{,}80$) пуансоном с углом конусности $\beta = 1^{\circ}30'$. Последнее можно объяснить тем, что опасная зона – зона разрушения в предварительно наклепанной заготовке и в особенности при больших углах конусности пуансона β – смещается к начальному сечению очага деформации (входу в коническую часть матрицы).

На рис. 8.7, 8.8 показано влияние угла конусности матрицы α, угла конусности пуансона β и степени предварительной деформации e_{i0} на изменение величины коэффициента жесткости напряженного состояния. Отсюда следует, что экстремум функции $K = K(\alpha)$ при минимальных значениях K находится в интервале $9^{\circ} < \alpha < 17^{\circ}$, а функции $K = K(\beta)$ при максимальных значениях K – в интервале $0{,}9^{\circ} < \beta < 1{,}1^{\circ}$.

При этом с уменьшением β экстремум функции $K = K(\alpha)$ смещается в сторону больших значений α (до 17°). Экстремум функции $K = K(\beta)$ мало зависит от угла конусности матрицы.

Увеличение степени предварительной деформации свыше e_{i0}=20% при всех условиях приводит к уменьшению по алгебраической величине коэффициента K. По-видимому, заметное уменьшение K с увеличением угла β можно объяснить существенным увеличением по модулю осевой составляющей силы внутреннего давления, действующей на стенку заготовки. При уменьшении β по сравнению с экстремальными значениями аналогичный эффект изменения K можно объяснить увеличением положительных сил трения на поверхности контакта заготовки с пуансоном.

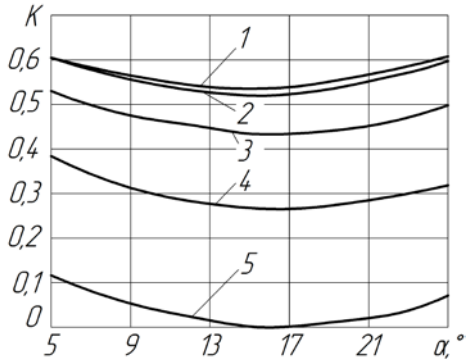


Рис. 8.7. Зависимость коэффициента жесткости схемы напряженного состояния K от угла конусности матрицы α, % (β=0,5°): при различных значениях e_{i0} *1* – 0; *2* – 20; *3* – 40; *4* – 60; *5* – 80

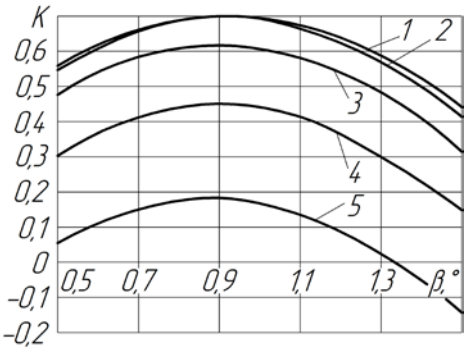


Рис. 8.8. Зависимость коэффициента жесткости схемы напряженного состояния K от угла конусности β (α=10°) при различных значениях e_{i0}, %: *1* – 0; *2* – 20; *3* – 40; *4* – 60; *5* – 80

Результаты расчета с учетом принятых допущений показывают (рис. 8.9, 8.10), что в момент, предшествующий разрушению в заготовке, действуют осевые растягивающие σ_z и радиальные σ_r сжимающие напряжения. Тангенциальное напряжение определяется из уравнения (8.8) и, в зависимости от соотношения напряжений σ_z и σ_r, может иметь положительное или отрицательное значение. Появление положительных, т.е. растягивающих, напряжений в тангенциальном направлении вызвано деформацией удлинения в тангенциальном направлении внутреннего слоя заготовки при вытяжке коническим пуансоном.

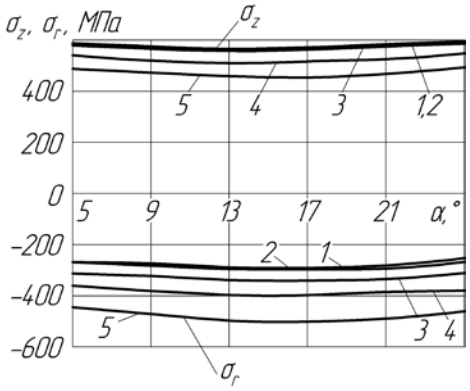


Рис. 8.9. Влияние угла конусности матрицы α (β=0,5°) на значения главных напряжений (σ_z, σ_r) при различных степенях предварительной деформации e_{i0}, %: *1* – 0; *2* – 20; *3* – 40; *4* – 60; *5* – 80

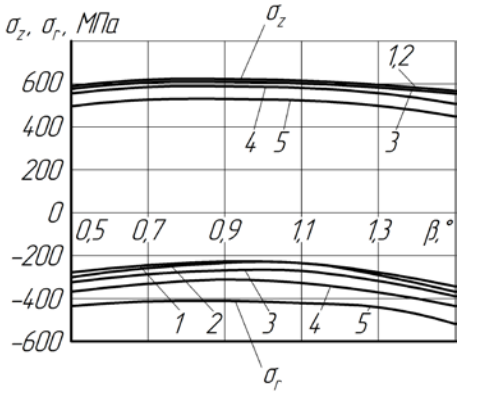


Рис. 8.10. Влияние угла конусности пуансона β на значения главных напряжений (σ_z, σ_r) при различных степенях предварительной деформации e_{i0}, %: *1* – 0; *2* – 20; *3* – 40; *4* – 60; *5* – 80

Появление сжимающих тангенциальных напряжений ($\sigma_\theta < 0$) наблюдается при вытяжке предварительно сильно упрочненных заготовок ($e_{i0} = 0{,}80$) коническим пуансоном с углом конусности $\beta = 1^o30'$. Это связано с перемещением зоны предразрушения ко входу в ОПД.

8.4. Вытяжка с утонением через две матрицы

Вытяжка через две и большее число матриц применяют достаточно широко в холодноштамповочном производстве для достижения больших степеней деформации и сокращения количества вытяжных операций, а также для уменьшения разностенности и кривизны деталей.

Вытяжка через несколько матриц может выполняться по схемам последовательной и одновременной вытяжки.

В первом случае (рис. 8.11) деформация выполняется за два периода с промежуточной разгрузкой при двух матрицах. Число периодов (деформаций), в общем случае, соответствует количеству матриц. В пределах каждого периода формируется один ОПД и деформирование заготовки осуществляется за четыре стадии, характерных для случая вытяжки через одну матрицу. При этом в любом расчетном сечении j деформированной заготовки общая степень деформации определяется как сумма степеней деформации, реализованных при протягивании через каждую матрицу в отдельности, т.е.

$$e_{ii}^{j} = \sum_{i=1}^{n} e_{ii}^{j} , \qquad (8.15)$$

где n – количество матриц.

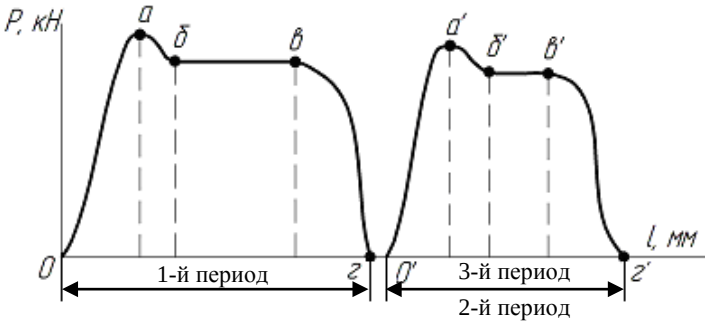
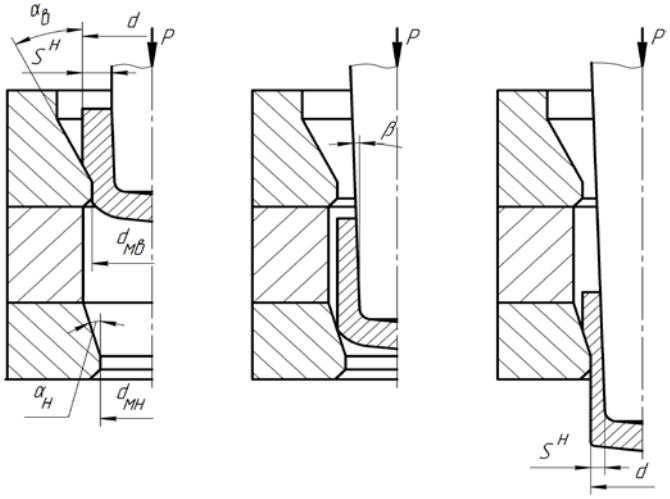


Рис. 8.11. Схема процесса последовательной вытяжки через две матрицы: *а* – схема диаграммы “усилие–путь инструмента” $P - h$; *б* – первый период деформации – вытяжка в верхней матрице; *в* – второй период деформации – разгрузка; *г* – третий период деформации – вытяжка в нижней матрице



б *в* *г*

Рис. 8.11 (окончание)

Схема сил и напряжений в каждом из ОПД аналогична схеме при вытяжке через одну матрицу. К особенностям процесса по сравнению с вытяжкой через одну матрицу относятся следующие:

- деформирование в нижней матрице предварительно упрочненной в верхней (предыдущей) матрице заготовки;
- появление дополнительных сил трения на поверхности контакта краевой части заготовки с пуансоном в межматричном пространстве;
- появление при протягивании через каждую последующую (нижнюю) матрицу в краевой части заготовки тангенциальных растягивающих напряжений σ_t и, как следствие, тангенциальных деформаций удлинения ($\varepsilon_\theta>0$), что может сопровождаться локализацией деформации и разрушением с образованием продольных трещин в зоне кромки (в особенности при наличии концентраторов напряжений на кромке).

После вытяжки в верхней матрице заготовка по внутренней поверхности плотно облегает конический пуансон. Как только начинается ее деформация в нижней матрице, краевая часть заготовки, находящаяся в межматричном пространстве, будет перемещаться вверх по пуансону и вследствие этого испытывать действие растягивающих напряжений в окружном направлении и, соответственно, удлиняется в этом направлении. Ввиду наличия у краевой части заготовки, располагаемой в межматричном пространстве, свободных поверхностей (наружной цилиндрической и торцевой), краевая часть испытывает одноосное растяжение в тангенциальном направлении (без учета контактных напряжений):

$$\sigma_1 = \sigma_\theta; \quad \sigma_2 = \sigma_z = \sigma_3 = \sigma_r = 0;$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_z = \varepsilon_3 = \varepsilon_r = -1/2 \cdot \varepsilon_\theta.$$

Значение тангенциальной деформации определяется из геометрических соотношений по формуле

$$\varepsilon_\theta = \ln\left(1 + \frac{h_{i\text{в}}}{d_{i\text{в}}} \cdot \frac{\psi_{\text{н.ср}}}{1 - \psi_{\text{н.ср}}} \text{tg}\beta\right), \qquad (8.16)$$

где $h_{i\text{в}} / d_{i\text{в}} \le l_\text{м} / d_{\text{мв}}$; $h_{i\text{в}}$ – высота заготовки после протягивания через верхнюю (предыдущую) матрицу; $l_\text{м}$ – расстояние между матрицами; $\psi_{\text{н.ср}} = (\psi_\text{н}^\text{в} + \psi_\text{н}^\text{н})/2$ – среднее значение степени деформации (относительного сужения площади поперечного сечения) при протягивании через нижнюю матрицу; $\psi_\text{н}^\text{в}$, $\psi_\text{н}^\text{н}$ – степень деформации в верхнем и нижнем расчетных сечениях соответственно.

Предельная до потери пластической устойчивости интенсивность деформации для простого растяжения будет равна: $e_{i\text{y}} = \varepsilon_{i\text{y}} = n$. С учетом влияния разностенности заготовки и предварительного наклепа в предыдущей матрице это равенство следует записать в следующем виде:

$$e_{i\text{y}} = cn, \qquad (8.17)$$

где $c = f(\delta_s, \sigma_{0,2}/\sigma_\text{в})$; $\delta_s = (S_{max} - S_{min})/S_{ср}$ – относительная разностенность.

При $\varepsilon_\theta \ge e_{iy}$ возможна локализация деформации и появление продольных трещин на кромке.

Последовательная вытяжка преимущественно применяется для получения деталей небольшой высоты.

При одновременной вытяжке формируются и действуют одновременно несколько ОПД и промежуточные периоды полной разгрузки отсутствуют. Общая деформация также определяется суммированием степеней деформации, реализованных в каждой из матриц (8.15). Одновременная вытяжка через две матрицы протекает в три периода: 1 – вытяжка через верхнюю матрицу (рис. 8.12,*б*); 2 – вытяжка в двух матрицах (рис. 8.12,*в*); 3 – вытяжка через нижнюю матрицу (рис. 8.12,*г*). При этом в пределах каждого периода наблюдаются, полностью или частично, стадии процесса, характерные для случая вытяжки через одну матрицу.

Вытяжка через верхнюю (первый период) и нижнюю матрицы (третий период) в отдельности практически не отличается от вытяжки в эти периоды при последовательной схеме. Существенные отличия характерны для промежуточного периода одновременной вытяжки в двух матрицах. При этом формируются два основных ОПД в верхней и нижней матрицах, и при определенных условиях возможно взаимодействие их деформационных и силовых полей через промежуточную часть заготовки – блок *3* (рис. 8.13). Для анализа процесса одновременной вытяжки с утонением через две матрицы согласно

представленной схеме (рис. 8.13) принято: деформация осесимметричная, пуансон цилиндрический, заготовка разделена на участки сферическими (тороидальными) поверхностями с радиусами кривизны для верхней матрицы $\rho_{12} = b_в$ и $\rho_{23} = a_в$; для нижней матрицы – $\rho_{34} = b_н$, $\rho_{45} = a_н$. Соответственно выделено пять характерных участков–блоков заготовки. Блоки *1,3,5* являются жесткими и движутся с различными скоростями. Соотношение их скоростей определяется из условия равенства перемещаемых через проходные сечения матриц объемов металла заготовки.

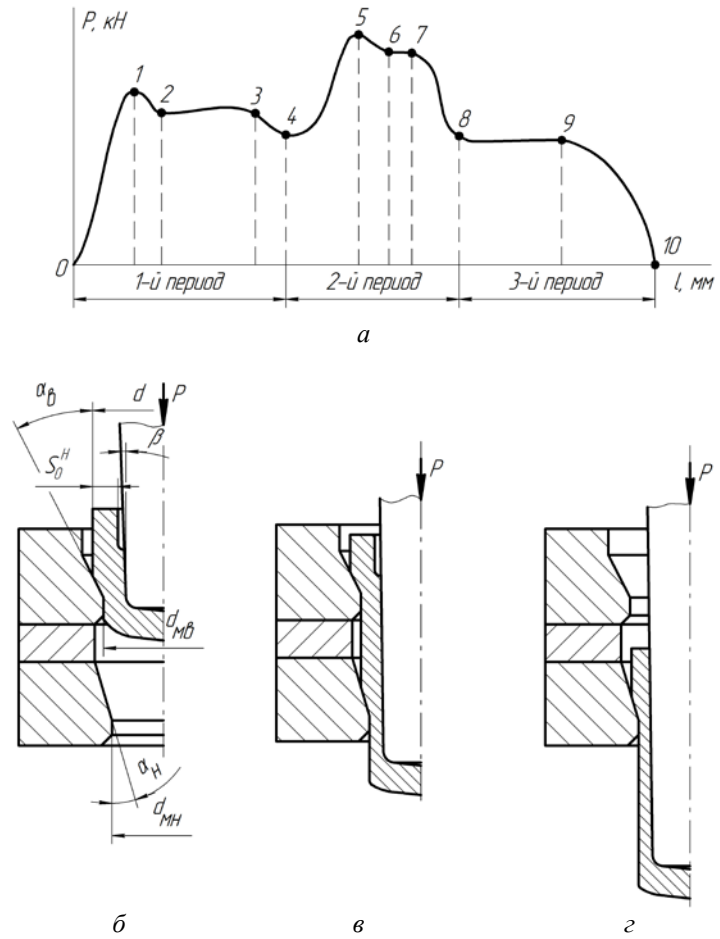


Рис. 8.12. Схема процесса одновременной вытяжки через две матрицы: *а* – схема диаграммы "усилие–путь инструмента" *P* – *h*; *б* – первый период деформации – вытяжка в верхней матрице; *в* – второй период деформации – одновременная вытяжка в двух матрицах; *г* – третий период деформации – вытяжка в нижней матрице

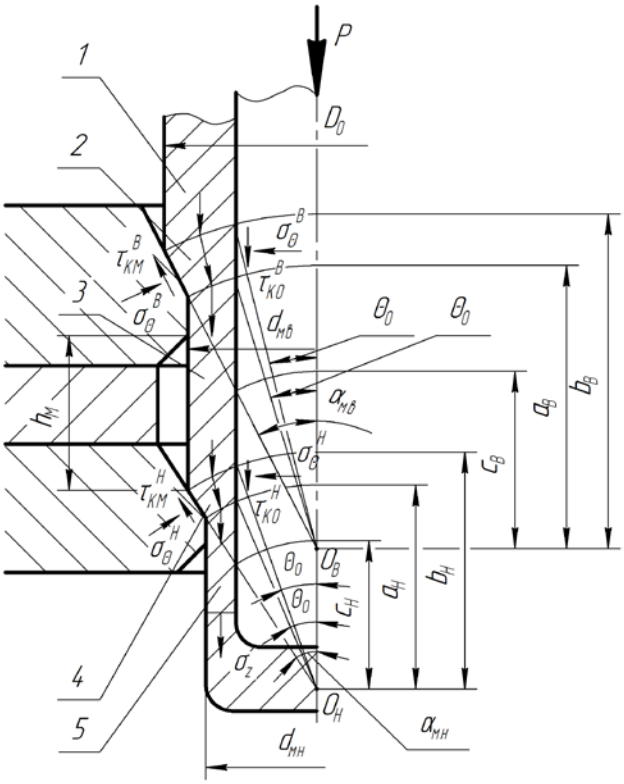


Рис. 8.13. Схема для анализа процесса “одновременной” вытяжки через две матрицы

Скорость перемещения блока *5* заготовки равна скорости движения пуансона, т.е. скорости деформирования v_0.

Скорость блока *3* будет меньше скорости блока *5* и равна:

$$v_3 = v_5 \frac{F_i}{F_{iB}} = v_0 \frac{F_i}{F_{iB}}, \qquad (8.18)$$

где F_i, F_{iB} – площади поперечного сечения деформируемой заготовки после протягивания через нижнюю и верхнюю матрицы соответственно.

Скорость перемещения блока *1* на входе в верхнюю матрицу определится по аналогичному соотношению, и с учетом (8.18) запишем:

$$v_1 = v_3 \frac{F_{iB}}{F_{i-1}} = v_5 \frac{F_i}{F_{iB}} \cdot \frac{F_{iB}}{F_{i-1}} = v_0 \frac{F_i}{F_{i-1}}, \qquad (8.19)$$

откуда следует, что $v_1 < v_3 < v_5 = v_0$.

Блоки *2* и *4* заготовки находятся в пластическом состоянии и представляют собой ОПД в верхней и нижней матрицах, где распределение скоростей описывается составляющими V_ρ, V_θ, V_φ в сферической системе координат [2]. Так как деформация осесимметричная, то V_φ=0, а V_ρ, V_θ определяются из условия несжимаемости. На границах ОПД возникают разрывы скоростей и деформации сдвига. На внутренней поверхности очага деформации, контактирующей с пуансоном, разрывы скоростей обращаются в нуль, на наружной поверхности (поверхности контакта с матрицей) они имеют наибольшее значение. Аналитическая оценка скоростей скольжения металла и скоростей деформации в ОПД дана в работе [1]. На представленной схеме (рис. 8.13) показаны действующие в ОПД напряжения. Существенной особенностью этого процесса является возникновение в ОПД значительных касательных напряжений $\tau_к$ $(\tau^{в}_{км}, \tau^{н}_{км}, \tau^{в}_{кп}, \tau^{в}_{кп},)$ и сил трения $T_п$ на поверхности контакта заготовки с пуансоном, направленных по ходу движения пуансона. Силы трения, появляющиеся в ОПД верхней матрицы и на выходе из него, в зоне цилиндрического пояска матрицы, а также в межматричном пространстве, а при определенных условиях полностью или частично нейтрализуют действие растягивающих напряжений на участке заготовки, находящемся между матрицами (блоке *3*, рис. 8.13) и, в принципе, могут создавать сжимающиеся напряжения

$$\sigma_{z3} = \frac{T_{пв}}{F_{iB}} < 0, \qquad (8.20)$$

где $T_{пв}$ – сила трения на поверхности контакта заготовки с пуансоном в зоне ОПД верхней матрицы. Известны опытные данные о выпучивании участка *3* заготовки, между матрицами от действия сжимающих напряжений σ_{z3}, т.е. потери устойчивости пластического деформирования согласно условию [1]

$$\sigma_{z3} \geq \sigma_{zкр},$$

где $\sigma_{zêð} \cong 4/3 \cdot S_{iâ}/d_{iâ} \cdot \sqrt{E_{k1}E_0}$; $\sigma_{zкр}$ – критическое значение осевого напряжения; $S_{iâ}/d_{iâ}$ - относительная толщина стенки после вытяжки через верхнюю матрицу; $E_k = d\sigma/d\varepsilon_i$, $E_с$ – касательный и секущий модули соответственно.

Для заготовок со средними относительными толщинами ($S_{iâ}/d_{iâ} > 2{,}5...3{,}0$) при симметричной форме потери устойчивости можно принять

$$\sigma_{zêð} = \sigma_i(\varepsilon_{iâ}). \qquad (8.21)$$

8.5. Технологические возможности и условия ограничения деформации при вытяжке

Понятие «технологические возможности процесса вытяжки с утонением» по критериям качества полностью соответствует изложенному в подразд. 7.4 для вытяжки без утонения.

Для оценки технологических возможностей процесса вытяжки с утонением важное значение имеет выявление по характерным стадиям этого процесса наиболее существенных технологических отказов, недопустимых видов брака и соответствующих условий ограничения деформации, исключающих возможность их появления. С учетом производственных данных и результатов исследований в табл. 8.2 дан систематизированный перечень возможных технологических отказов и условий ограничения деформации.

Таблица 8.2

Виды технологических отказов и условия ограничения деформации при вытяжке с утонением

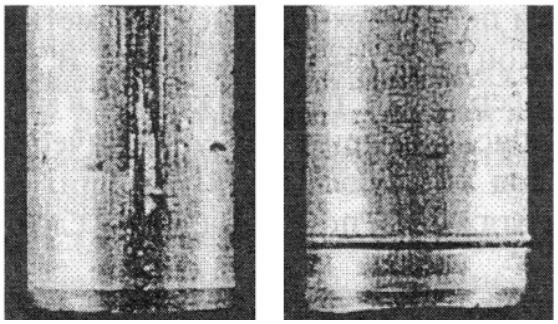
Стадия процесса	Вид технологического отказа	Условия ограничения деформации
1	2	3
1	1*а*. Потеря пластической устойчивости наружного поверхностного слоя заготовки с образованием наплыва	$e_{i1}^{\text{д}} < \left(e_{i1}^{\text{д}}\right)_{\text{у}}$
	1*б*. Разрушение наружного поверхностного слоя дна заготовки с образованием поперечных микротрещин (надрывов)	$\omega_{i1}^{\text{д}} \le \left[\omega_i^{\text{д}}\right]$
	1*в*. Образование в донной части заготовки зон крупнокристаллической структуры	$e_{i1}^{\text{д}} > e_{i\text{кр}2}$
	1*г*. Смятие внутренней поверхности придонных участков заготовки, контактирующих с закругленной кромкой пуансона	$q_1^{\text{н}} < \sigma_{0,2}^{\text{н}}\left(\sigma_{\text{т}}^{\text{н}}\right)$
	1*д*. Разрушение (пробивка) дна заготовки	$P_{1\max} < P_{\text{пр}}$
	1*е*. Потеря продольной устойчивости пуансона	$P_{1\max} \le \dfrac{1}{K_{\text{у}}} P_{\text{кр}}$
2	2*а*. Потеря пластической устойчивости наружного поверхностного слоя заготовки с образованием наплыва и поднутрения в придонном участке заготовки	$e_{i2}^{\text{н}} < \left(e_{i2}^{\text{н}}\right)_{\text{у}}$
	2*б*. Разрушение наружного поверхностного слоя придонного участка заготовки с образованием поперечных микротрещин (надрывов)	$\omega_{i2}^{\text{н}} \le \left[\omega_i^{\text{н}}\right]$
	2*в*. Потеря пластической устойчивости внутреннего слоя придонного участка с образованием “шейки”	$\omega_{i2\text{в}}^{\text{н}} \le 0{,}25$
	2*г*. Разрушение внутреннего слоя придонного участка заготовки с образованием микротрещин	$\omega_{i2\text{в}}^{\text{н}} \le \left[\omega_i^{\text{н}}\right]$
	2*д*. Образование в придонном участке угловых зон крупнокристаллической структуры	$e_{i\text{кр}1} < e_{i2}^{\text{у}} > e_{i\text{кр}2}$

Окончание табл. 8.2

1	2	3
3	3*а*. Нарушение продольной прочности с образованием поперечных трещин	$\omega_{i3}^{j} \le \left[\omega_i^{j}\right]$
	3*б*. Потеря продольной устойчивости в межматричном пространстве	$P_{z0} \le P_{\text{кр}}$ $\sigma_{z0} < \sigma_{\text{кр}}$
	3*в*. Локализация и разрушение заготовки с образованием в стенке продольных трещин	$\varepsilon_{\theta}^{j} < \varepsilon_{\theta y}^{j}$
	3*г*. Появление значительной разностенности	$\delta_S^{j} \le \left[\delta_S^{j}\right]$
	3*д*. Отклонение значений характеристик механических свойств материала детали от заданных техническими условиями значений	$e_{i\text{т}1}^{j} < e_i^{j} < e_{i\text{т}2}^{j}$
4	4*а*. Обрыв кромки (нарушение продольной прочности)	$\omega_{i4}^{\text{в}} \le \left[\omega_i^{\text{в}}\right]$
	4*б*. Растрескивание кромки (нарушение поперечной прочности)	$\varepsilon_i^{\text{в}} < \varepsilon_{iy}^{\text{в}}$
5	Потеря продольной устойчивости стенки (кромки) с образованием поперечных складок	$\sigma_{z5} < \sigma_{\text{кр}}^{\text{в}}$

В табл. 8.2 приняты следующие обозначения: $\omega_{i1}^{\text{д}}$, $\omega_{i2}^{\text{н}}$, $\omega_{i2\text{в}}^{\text{н}}$, ω_{i3}^{j}, $\omega_{i4}^{\text{в}}$, $[\omega_i^{\text{д}}]$, $[\omega_i^{\text{н}}]$, $[\omega_i^{j}]$, $[\omega_i^{\text{в}}]$ – фактические и допустимые значения коэффициентов запаса (ресурса) пластичности в соответствующих расчетных сечениях заготовки; $P_{1\max}$, $P_{\text{кр}}$ – максимальное и критическое усилия; e_{i1}^{j} , $e_{i2}^{\text{у}}$, $(e_{i2})_{\text{кр}}$ – фактические и критическое значения величины степени деформации в дне и угловой зоне; ε_{θ}^{j}, $\varepsilon_{\theta}^{\text{в}}$, $\varepsilon_{i\text{у}}^{\text{в}}$, $\varepsilon_{i\text{у}}^{j}$ – значения тангенциальной и предельной до потери устойчивости деформации; σ_z, $\sigma_{\hat{\text{e}}\text{p}}^{\hat{\text{a}}}$ – действующие осевые и критические сжимающие напряжения в стенках заготовки; $P_{\text{кр}}$ – критическое усилие (пробивки дна заготовки); $K_{\text{у}}$ – коэффициент запаса устойчивости (для закаленной стали $K_{\text{у}} = 2 \div 3$); $e_{i\text{т}1}$, $e_{i\text{т}2}$ – степени деформации, обеспечивающие в результате упрочнения минимальный ($\sigma_{\text{в}\min}^{j}, HV_{\min}^{j}$) и максимальный ($\sigma_{\text{в}\max}^{j}, HV_{\max}^{j}$) уровни прочности (твердости), заданные техническими условиями на деталь.

Исследования указывают на возможность выпучивания металла (образование наплыва) при входе в ОПД при малых деформациях (ψ=0,06÷0,10) и больших углах конусности матрицы ($\ge$18÷30°) (рис. 8.14).



а *б*

Рис. 8.14. Разрушение наружного поверхностного слоя заготовки с образованием задиров (*а*) в результате образования на начальной стадии вытяжки наплыва (*б*)

В условии 1*а* табл. 8.2 можно принять

$$\left(e_{i1}^{\text{д}}\right)_{\text{у}} \le \ln 1/\left(1-\psi_{\text{кр}}\right), \qquad (8.22)$$

где $\psi_{\text{кр}} = \alpha(0{,}29+\alpha/9)$ – для случая плоского волочения; α – односторонний угол конусности матрицы в рад.

При несоблюдении условия 1*а* размеры ОПД значительно уменьшаются, и пластическая деформация в радиальном направлении будет неоднородна. Максимальная деформация характерна для поверхностного слоя, минимальная – у внутренней границы ОПД. В центральной части дна заготовки пластическая деформация отсутствует.

Величина деформации $e_{i1}{}^{\text{д}}$ определяется с учетом (8.22) и границ ОПД формируемого в донной части заготовки (8.1).

Стремление снизить степень деформации при вытяжке изделий из малопластичных материалов, чтобы разгрузить опасное сечение, может привести к разрушению – образованию надрывов металла на наружной поверхности или к процессу "скобления" с отделением металла, если вытяжка производится через матрицу с углом $\alpha \ge \pi/6$, т.е. к появлению технологических отказов вида 1*б*.

В этом случае поверхностные и подповерхностные слои металла перемещаются вверх по конической поверхности матрицы. Точки деформируемой поверхности, расположенные в месте сопряжения цилиндрического пояска матрицы и ее конической поверхности, будут находиться под действием растягивающих напряжений, которые вызывают натяжение поверхностного слоя и, возможно, его разрыв.

Для предотвращения технологических отказов этого вида должно выполняться условие ограничения деформации вида 1*б*, в котором коэффициент

использования ресурса пластичности $\omega^{д}_{i-1}$ и его допустимое значение $[\omega^{д}_{i}]$ определяются известными соотношениями феноменологической теории разрушения:

$$\omega^{д}_{i1} = \left(e^{д}_{i1} / e_{ip}\right)^{a}, \qquad a = a_0^{1+0,14K}. \tag{8.23}$$

Так как реальные технологические процессы характеризуются применением, как правило, промежуточной или финишной термообработки, например рекристаллизационного отжига, то при несоблюдении условия 1*в* у некоторых материалов наблюдается недопустимый рост зерна. Это приводит к резкому снижению характеристик механических свойств материала и в некоторых случаях качества поверхности заготовок. Критические деформации $e_{i\text{кр}1}$ и $e_{i\text{кр}2}$ в условии $e_i < e_{i\text{кр}2}$ устанавливаются экспериментально по диаграммам рекристаллизации и допускаемому росту зерна.

Критическая степень деформации $e_{i\text{кр}}$ зависит от химического состава металла, условий деформации и температуры отжига. При проведении исследования для определения температур рекристаллизации и критической степени деформации авторы применяли методы твердости и микроструктурного анализа. Анализ результатов экспериментов по определению температур рекристаллизации и критических степеней деформации на низкоуглеродистых сталях (11КП, 18КП, 11ЮА) позволил установить следующее.

1. Температуры начала $t^{н}_{р}$ и конца $t^{к}_{р}$ рекристаллизации соответствуют интервалу 500…700°С. Увеличение скорости деформации от $\varepsilon_i = 3{,}0\cdot10^{-3}$ до $2{,}3\cdot10^{2}$ $с^{-1}$ не оказывает существенного влияния на температуры рекристаллизации, отмечается тенденция их смещения в сторону увеличения.

2. В области малых степеней деформации $e_i < e_{i\text{кр}1}$ независимо от скорости деформации рекристаллизация не наблюдатся при всех температурах отжига.

3. С увеличением степени деформации температуры начала $t^{н}_{р}$ и конца $t^{к}_{р}$ снижаются и процесс рекристаллизации практически заканчивается при $t = 600$°С.

4. При температуре конца рекристаллизации $t^{к}_{р}$ критическая степень деформации изменяется с увеличением скорости деформации и приближенно равна:

$e_{i\text{кр}}$	$\dot{\varepsilon}_i$, c^{-1}
0,15	$3{,}0\cdot10^{-3}$
0,10 – 0,15	$2{,}0\cdot10^{1}$
0,05 – 0,10	$2{,}3\cdot10^{2}$

Нижние значения отвечают $e_{i\text{кр}1}$, верхние – $e_{i\text{кр}2}$.

Исследования показали, что в наиболее общем случае в донной части заготовок могут быть выделены три характерные зоны (рис. 8.15): *1* – больших пластических деформаций ($e_{i1}^{д} > e_{iкр2}$); *2* – критических деформаций ($e_{iкр1} < e_{i2}^{д} < e_{iкр2}$); *3* – малых упруго-пластических деформаций ($e_{i}^{д} < e_{iкр1}$). По внутренней границе зоны *1* зерна ориентированы по контуру перехода от дна к стенке, причем деформация зерен возрастает при переходе от внутренней к наружной поверхности заготовки. Наиболее крупная неоднородная структура наблюдается у внутренней границы этой зоны. В зоне стенки заготовки из-за интенсивной пластической деформации зерна имеют большую вытянутость вдоль оси, в зоне *3* наблюдается слабо выраженная полосчатость, в зоне *2*, прилегающей к внутренней поверхности, сохраняется структура, подобная исходной, у наружной поверхности выявлена ориентировка в радиальном направлении.

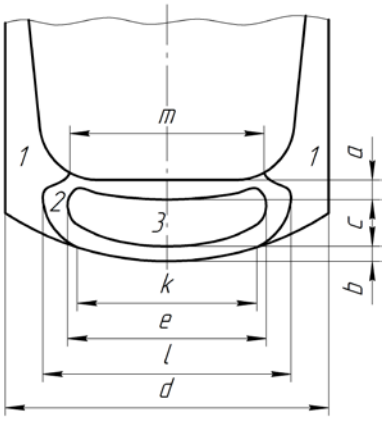


Рис. 8.15. Схема формирования в донной части заготовки зоны крупнокристаллической структуры металла при последующем рекристаллизационном отжиге

Условие 1*г* исключает смятие контактирующих с вытяжкой кромкой пуансона участков внутренней поверхности с образованием наплыва и раздачу придонного участка до входа его в матрицу.

Удельное усилие в условии 1*г*

$$q_1^{н} = P_{1max} / F_{i-1}^{н}, \qquad (8.24)$$

где $F_{i-1}^{н} = \pi / 4 \cdot \{[d_{i-1} - 2S_{i-1}^{н}]^2 - [d_{i-1} - 2(S_{i-1}^{н} + r_{i-1}\cos\beta_{i-1})]^2\}$ – площадь поверхности контакта заготовки с пуансоном; $d_{i\text{-}1}$, $S_{i\text{-}1}$, $\beta_{i\text{-}1}$ – наружный диаметр, толщина в нижнем расчетном сечении, радиус и угол конусности заготовки.

Максимальное технологическое усилие на 1-й стадии процесса P_{1max} определяется в соответствии с изложенными выше рекомендациями:

$$P_{1max} = qF_n;$$

$$q = \sqrt{3}\sigma_i(\varepsilon_{iср}^{д})\varepsilon_{iср}^{д}[2{,}2(2\cos\alpha - 1)^2 + f / 2\sin\alpha];$$

$$F_n = \pi / 4(d_{i-1} - 2S_{i-1})^2.$$

Условие прочности дна 1*д* исключает возможность его пробивки. Этот вид разрушения встречается крайне редко при вытяжке заготовок из малопластичных и слабо упрочняющихся материалов в матрицах с большими угла-

ми конусности.

В условии продольной прочности пуансона $P_{кр} = \eta \cdot EJ / l^2$, где J – осевой момент инерции ($J = \pi(d_i - 2S_i^н)^4 / 64$); l – длина незакрепленной части пуансона ($l = C_i(H_i - S_i^д)$); H_i – высота вытянутой заготовки, C_i>1 – коэффициент, учитывающий соотношение длин пуансона l и заготовки H_i; η =2,467 (для случая жесткого закрепления пуансона в пуансонодержателе и нагружения в торец продольной силой P_{1max}).

Условие ограничения деформации 2*а* на второй стадии процесса аналогично условию 1*а* и

$$\left(e_{i2}^н\right)_у \le \ln\frac{1}{1-\psi_{кр}}, \qquad (8.25)$$

где $\psi_{кр}$ определяется по (8.22).

Степень деформации в нижнем расчетном сечении может быть определена по соотношению

$$e_{i2}^н = 2/\sqrt{3}\ln S_{i-1}^н / S_i^н .$$

В условии прочности 2*б*

$$\omega_{i2}^н = \left(e_{i2}^н / e_{iр}^н\right)^{a_2}, \qquad (8.26)$$

где $e_{iр}^н = e_{iр}(\varepsilon_{iр-1}^н, K_2)$ – предельная до разрушения степень деформации в нижнем расчетном сечении – определяется с учетом свойств материала в этом сечении $\varepsilon_{iр}^н$ и коэффициента жесткости схемы напряженного состояния K_2.

Условия ограничения деформации 2*в, г* исключают локализацию и последующие разрушения внутреннего поверхностного слоя придонного участка (рис. 8.16). Коэффициент использования ресурса пластичности внутреннего слоя определяется по соотношению

$$\omega_{i2в}^н = \left[e_{i2в}^н / e_{iр}\left(\varepsilon_{iр}, K_{2в}\right)\right]^{a_2}, \quad (8.27)$$

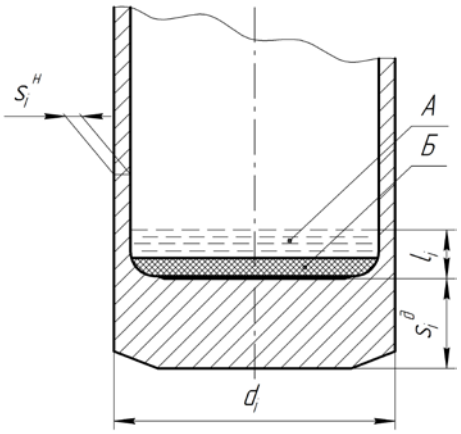


Рис. 8.16. Схемы расположения зон локализации и разрушения на внутренней поверхности на второй стадии процесса вытяжки с утонением

где $K_{2в}$ – коэффициент жесткости схемы напряженного состояния внутреннего слоя заготовки на 2-й стадии про-

цесса.

Локализации деформации способствует и образование поднутрения в результате нарушения условия ограничения деформации 2*а*. Из производственного опыта известно, что в наибольшей степени это явление присуще вытяжке толстодонных заготовок с отношением $S_i^{д}/d_i = 0{,}4 \div 0{,}6$ и $S_i^{д}/S_i^{н} = 8 \div 10$. При этих значениях указанных параметров возможно проявление краевого эффекта и неплотное прилегание внутренней поверхности придонного участка заготовки к пуансону.

Краевой эффект проявляется при длине участка неприлегания $l_i \le 3/b$, где $b \approx 1{,}285/\sqrt{S_i^{н} R_i}$ при μ=0,3. С учетом этого $l_i \approx 2{,}3\sqrt{S_i^{н} R_i}$.

Влияние краевого эффекта будет сказываться на процессе вытяжки в связи с возможным сохранением зазора и свободной внутренней поверхности в зоне очага деформации. Это определяет возможное отсутствие на этой поверхности контактных напряжений, положительных сил трения и способствует увеличению растягивающих напряжений σ_z и созданию жесткой схемы напряженного состояния в деформируемом поверхностном слое. Одной из мер предупреждения разрывов на внутренней поверхности может служить обеспечение плотного сопряжения пуансона и заготовки на участке длиной *l*, но это может привести к образованию наплывов (складок).

Условия ограничения деформации 2*д* аналогичны 1*в*.

Определенные сложности возникают при оценке степени деформации в зоне сопряжения стенки и дна – зоне угла $e_{i2}^{у}$. Для приближенной оценки используем расчетную схему (рис. 8.17), согласно которой

$$e_{i2}^{у} = \ln S_{i-1}^{у} / S_i^{у}, \qquad (8.28)$$

где

$$S_{i-1}^{у} = 1/\cos\gamma_i \left(S_{i-1}^{н} + r_{i-1}\cos\beta_{i-1}\right) - r_{i-1} =$$
$$= S_{i-1}^{н}\left[1/\cos\gamma_{i-1}\left(1 - r_{i-1}\cos\beta_{i-1}/S_{i-1}^{н}\right) - r_{i-1}/S_{i-1}^{н}\right];$$

$$S_i^{у} = 1/\cos\gamma_i \left(S_i^{н} + r_i\cos\beta_i\right) - r_i = S_i^{н}\left[1/\cos\gamma_i\left(1 - r_i\cos\beta_i/S_i^{н}\right) - r_i/S_i^{н}\right];$$

$$\gamma_i = \operatorname{arctg}\frac{r_i}{S_i^{н} + r_i\cos\beta_i} = \operatorname{arctg}\frac{r_i}{S_i^{н}}\cdot\frac{1}{1 + r_i\cos\beta_i/S_i^{н}};$$

$$\gamma_{i-1} = \operatorname{arctg}\frac{r_{i-1}}{S_{i-1}^{н} + r_{i-1}\cos\beta_{i-1}} = \operatorname{arctg}\frac{r_{i-1}}{S_{i-1}^{н}}\cdot\frac{1}{1 + r_{i-1}\cos\beta_{i-1}/S_{i-1}^{н}}.$$

Ввиду малости угла β (0 °30'…1°30') можно принять допущение, что $\cos\beta \approx 1$, и упростить приведенные соотношения.

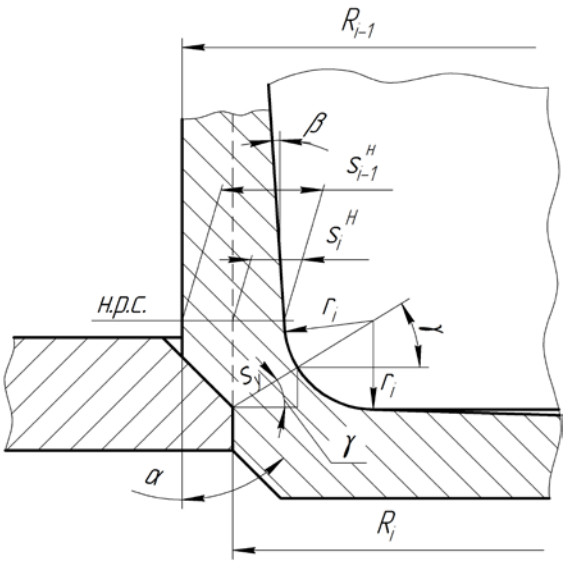


Рис. 8.17. Расчетная схема к определению степени деформации в зоне “угла”

Продольная прочность (исключение образования поперечных трещин – рис. 8.18) заготовки на стационарной стадии процесса обеспечивается при выполнении условия “Зa” (см. табл. 8.2), в котором коэффициент использования запаса (ресурса) пластичности определяется согласно рекомендациям феноменологической теории разрушения:

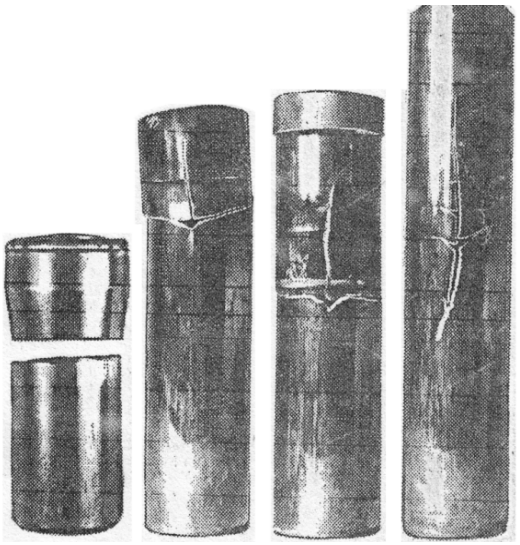
$$\omega^{j}_{i3} = \int_{0}^{e_i} a e_i^{a-1} de_i \Big/ \left(e^{j}_{ip}(x_1, x_2, \ldots, x_k)\right)^{a}, \qquad (8.29)$$

где $a = a_0^{1+0,14K}$, $e_i = 2/\sqrt{3}\ln F^{j}_{i-1}/F_i^{j}$, в том числе для многооперационных процессов с использованием уравнения баланса ресурса пластичности:

$$\sum^{N_{зц}}(\omega_i - \Delta\omega_i) + \sum^{N_{нц}}(\omega_{im} - \Delta\omega_{im}) \le [\omega_i], \qquad (8.30)$$

где $N_{зц}$, $N_{нц}$ – количество завершенных и незавершенных технологических циклов соответственно; $\Delta\omega_i$, $\Delta\omega_{im}$ – коэффициенты, учитывающие возможное "залечивание" дефектов в металле, возникающих в результате пластической деформации, при последующей термообработке и разгрузке заготовки.

Нарушение продольной прочности с образованием поперечных трещин может выявляться в случае вытяжки как через одну, так и через две матрицы на стационарных стадиях.



а *б* *в* *г*

Рис. 8.18. Нарушение продольной (*а*), продольной и поперечной (*б*, *в*, *г*) прочности заготовок при вытяжке с утонением

Исследования показывают, что при вытяжке через две матрицы возможны различные варианты нарушения продольной прочности (рис. 8.19):

1) с отрывом части заготовки в верхней матрице, когда степень деформации в ней превышает предельное значение для вытяжки через одну матрицу;

2) с отрывом краевой кольцевой части заготовки в нижней матрице в момент ее выхода из верхней (в межматричном пространстве не действует в этом случае заталкивающая сила P_{z0}, разгружающая опасное сечение);

3) одновременное разрушение заготовки в двух сечениях, на выходе из верхней и нижней матриц ($\alpha_0 = \alpha_н = 22°$, $e_{iв} = 80\%$, $e_i = 130\%$, $\beta = 1^o30'$, встречается редко);

4) разрушение на выходе из нижней матрицы при малых степенях деформации в верхней ($e_{iв} = 5\%$, $\alpha_в = 2°$) и создании большой сжимающей силы P_{z0} в межматричном пространстве, приводящем к выпучиванию части заготовки, находящейся в этом пространстве, и, как следствие, к увеличению деформации в нижней матрице и растягивающих напряжений;

5) одновременное нарушение продольной и поперечной прочности при деформировании наклепанной заготовки пуансоном с большим углом конусности ($\beta \geq 1^o30'$).

Потеря продольной устойчивости части заготовки, находящейся в межматричном пространстве при одновременной вытяжке через две матрицы, с выпучиванием, возможна при появлении значительной сжимающей силы P_{z0} и напряжения σ_{z0}. Критическое значение напряжения может быть определено в соответствии с известными рекомендациями для цилиндрических оболочек (8.20).

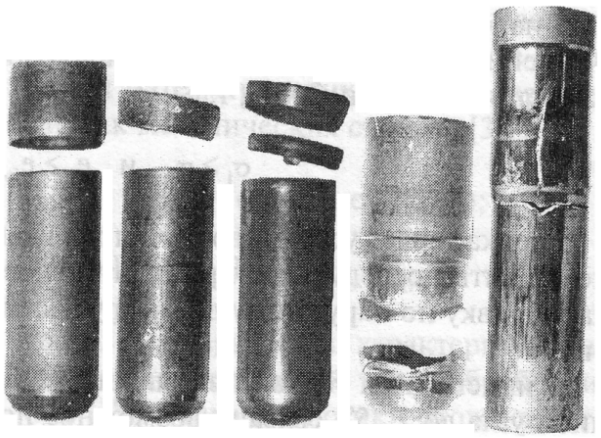


Рис. 8.19. Виды разрушения заготовок при вытяжке с утонением через две матрицы

Принципиально возможна еще одна форма потери продольной устойчивости, связанная с локализацией деформации и образованием поперечной "шейки", при больших деформациях в верхней матрице. В этом случае в стенках заготовки действуют растягивающие напряжения, близкие к значениям предельно-устойчивого напряжения, и выполняются условия достижения второго предельного состояния, т. е. $\sigma_i \geq \sigma_{iy}$ и $e_i \geq e_{iy}$. Стенка теряет устойчивость и произвольно утоняется, что может исключить последующее принудительное утонение стенки и даже калибровку по наружному диаметру части заготовки в нижней матрице.

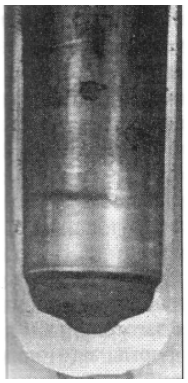


Рис. 8.20. Вид внутренней поверхности заготовки с “наплывом” металла в придонном участке (сталь 18ЮА, $e_{iв}$=50%, $e_{iн}$=90%, $\alpha_в$=2°, $\alpha_н$=12°)

С изменением условий вытяжки в верхней матрице (с уменьшением угла до 2…5°) связано возможное появление еще одного вида технологического отказа, который также можно квалифицировать как определенную разновидность потери пластической устойчивости, – формирование кольцевого наплыва в придонном участке заготовки (рис. 8.20). Это явление связано с действием активных сил трения на поверхности пуансона и опережающим по сравнению с движением пуансона течением металла и его затеканием под торец пуансона.

Поперечная устойчивость и прочность (исключение образования продольных трещин) (см. рис. 8.18) заготовки при вытяжке обеспечивается условием 3*б*, в котором тангенциальная деформация ε_θ в межматричном пространстве при

вытяжке через две или большее число матриц и допустимая устойчивая деформация ε_{ty} могут определяться из соотношений

$$\varepsilon_\theta = \ln\left[1+\frac{l_{mi}}{d_{\text{пв}}}\cdot\frac{\psi_{\text{нср}}}{1-\psi_{\text{нср}}}\text{tg}\beta\right], \tag{8.31}$$

$$\varepsilon_{\theta\text{у}} = \left[1-\frac{\left(\sqrt{\delta_S+64}-\sqrt{\delta_S}\right)\sqrt{\delta_S}}{2{,}4}\right]n, \tag{8.32}$$

где l_{mi} – расстояние между матрицами; $d_{\text{пв}}$ – диаметр цилиндрического пояска верхней матрицы; δ_S – относительная разностенность заготовки; $\psi_{\text{нср}}$ – среднее арифметическое сужение площадей верхнего и нижнего сечений.

Формирование именно заданных значений характеристик механических свойств детали гарантируется условием *3г* и использованием в качестве основания математических моделей:

$$\sigma_{\text{в}}^j = \sigma_{\text{в}}^j\left(\sigma_{\text{в}0}^j, e_{i\text{т}}^j, t^j, \tau^j\right);$$

$$HV^j = HV^j\left(HV_0^j, e_{i\text{т}}^j, t^j, \tau^j\right), \tag{8.33}$$

где t^j, τ^j – параметры, характеризующие режим последующей термообработки; $\sigma_{\text{в}0}$, HV_0 – характеристики отожженного материала.

Обрыв кромки по физической природе не отличается от нарушения продольной прочности стенки заготовки, а следовательно, условия ограничения деформации также аналогичны. В некоторых случаях обеспечение продольной прочности может осложняться наличием значительной косины краевой части заготовки и выраженных фестонов.

Нарушение поперечной прочности (растрескивание кромки) наблюдается при выраженной "фестонистости" кромки. Продольные трещины появляются преимущественно в месте впадины между фестонами и частично на гребне фестона. В последнем случае трещины возникают лишь при больших значениях степени деформации, выраженной разностенности и расположены вдоль направления прокатки полос. Появление продольных трещин во впадине между фестонами инициируется концентраторами напряжений на торцевой поверхности венчика заготовки, являющихся следствием некачественной поверхности среза вырубленных плоских заготовок.

Появление тангенциальных растягивающих напряжений в конце процесса вытяжки (в особенности при протягивании через нижнюю матрицу при вытяжке через несколько матриц) приводит к локализации деформации, появлению и раскрытию трещин. Условия ограничения деформации *4б* и *3б* аналогичны, различие состоит в величине наклепа в разных сечениях и влиянии краевого эффекта ввиду образования фестонов в случае *4б*. В некоторых случаях наблюдается потеря устойчивости, сопровождающаяся образованием наплыва (рис. 8.20).

Потерю продольной устойчивости тонкостенной заготовки (S_i/d_i = 0,025÷0,050) после вытяжки можно ожидать при съеме за верхнюю кромку. В условии ограничения деформации 5

$$\sigma_{z5} = P_{ci}/F_i \ ,$$

$$\sigma_{кр} = \frac{4}{3} C_1 \frac{S_i}{D_i} \sqrt{E_к E_с} \ , \qquad (8.34)$$

где P_{ci} – усилие съема; $E_к$, $E_с$ – касательный и секущий модули, определяемые по диаграмме "$\sigma_i - \varepsilon_i$" для материала заготовки; $C_1 \le 1$ – коэффициент, учитывающий несовершенство формы заготовки.

Усилие съема определяется из анализа условий торможения остывающей после деформации заготовки на нагретом пуансоне под действием радиальных напряжений.

Основные причины радиальных напряжений – термоупругие напряжения, а также остаточные напряжения в стенках детали, упругая разгрузка детали и пуансона.

Усилие снятия можно определить по эмпирической зависимости

$$P_с = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \sigma_i \cdot \pi \cdot S_1 \left(H_i - S_i^{д} \right) f_п ,$$

где K_1 – коэффициент, определяемый температурными напряжениями (K_1=0,5÷0,8); K_2 – коэффициент, определяемый остаточными напряжениями (K_2=0,8÷0,9); K_3 – коэффициент, определяемый прочими факторами (K_3=1,0÷1,05); H_i – высота заготовки; $f_п$ – коэффициент трения на поверхности пуансона.

Важнейшими показателями технологических возможностей процесса вытяжки с утонением являются предельная и допустимая степень деформации. Понятие о предельной деформации прежде всего связано с представлением о достижении материалом заготовки определенного физического предельного состояния, которое сопровождается качественными необратимыми изменениями, например: а) потерей устойчивости деформируемой заготовки при малых, упругопластических деформациях; б) потерей устойчивости деформируемой заготовки при больших пластических деформациях; в) разрушением деформируемой заготовки. Условие перехода в предельное состояние имеет следующий вид: $e_i/e_{iпр} \ge 1$, где e_i, $e_{iпр}$ – достигнутая и предельная степени деформации соответственно.

В некоторых случаях (например, на 1-й стадии процесса) понятие предельной деформации связывают также с достижением предельного состояния не материала заготовки, а материала рабочего штампового инструмента, которое может сопровождаться: а) потерей устойчивости в области упругих и малых упругопластических деформаций, б) разрушением.

В технологических расчетах и реализуемых процессах нельзя непосредственно использовать предельную деформацию $e_{iпр}$, как заведомо приводящую

к нарушению качества деталей и процессов, а следует принимать несколько меньшую, чем $e_{i\text{пр}}$, величину, заведомо исключающую переход металла в предельное состояние и именуемую допустимой степенью деформации $e_{i\text{доп}}$, т.е. $e_{i\text{доп}}/e_{i\text{пр}} < 1$ или $e_{i\text{доп}} = ke_{i\text{пр}}$, где

$$k < 1, \qquad (8.35)$$

k – коэффициент запаса пластичности. В последнем соотношении неопределенной величиной является коэффициент запаса k. Любая заданная его величина не гарантирует 100%-ное исключение дефектов в изделиях и нарушение качества процесса, так как важнейшим свойством реальных процессов является рассеяние их характеристик.

Причиной рассеяния значений технологических характеристик является то, что на результаты их измерения и формирования влияет большое число полностью или частично контролируемых и неконтролируемых факторов, которые можно разделить на две группы. К первой группе относятся факторы, связанные с технологией процесса и свойствами исходного материала: химический состав шихты; режим выплавки и термообработки металла (температура, скорость нагрева и охлаждения, продолжительность выдержки); условия штамповки (температура, скорость процесса, условия трения, характер нагружения); точность изготовления рабочего инструмента и др. Во вторую группу входят факторы, связанные с условиями испытаний образцов и заготовок при определении предельных деформаций экспериментальными методами: режимы изготовления и подготовки заготовок для испытаний; режимы испытаний (температура, скорость процесса, условия трения, характер нагружения); погрешность измерений и расчетов исследуемых величин (размеров, деформации). Из этого следует, что технологические характеристики, в том числе предельные деформации, по своей природе не являются детерминированными величинами, точные численные значения которых определены однозначно. Но они не являются и произвольными величинами. Имея достаточный объем данных, используя теорию вероятности и методы математической статистики, можно оценить предельную и допустимую степени деформации в процессах штамповки с учетом их случайной природы. На рис. 8.21 показана схема оценки предельной $e_{i\text{пр}}$ и до-

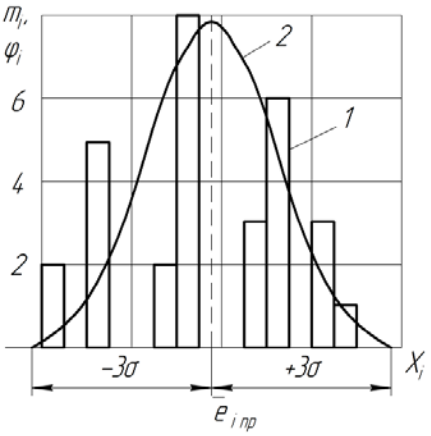


Рис. 8.21. Схема оценки предельной и допустимой степени деформации: *1* – гистограмма; *2* – кривая теоретического распределения

пустимой $e_{i\text{доп}}$ степени деформации и границы поля рассеяния $\pm 3\sigma$, отвечающие при нормальном законе распределения случайной величины так называемому трехсигмовому интервалу (при доверительной вероятности $P = 0{,}997$).

Проведенные авторами исследования подтверждают предположение, что распределение предельных деформаций в процессах вытяжки не противоречит нормальному закону. Это позволяет сформулировать статистические критерии оценки предельной и допустимой степени деформации в виде

$$e_{i\text{пр}} = \bar{e}_{i\text{пр}} \pm 3S_{ei} = \bar{e}_{i\text{пр}}\left(1 \pm 3V_{ei}\right), \qquad (8.36\text{а})$$

$$e_{i\text{доп}} = \bar{e}_{i\text{пр}} - 3S_{ei} = \bar{e}_{i\text{пр}}\left(1 - 3V_{ei}\right), \qquad (8.36\text{б})$$

где $e_{i\text{пр}}$ – среднее арифметическое выборки (для генеральной совокупности – математическое ожидание); S_{ei} – среднее квадратическое отклонение выборки (среднее квадратическое отклонение генеральной совокупности – σ_{ei}); $V_{ei} = S_{ei} / \bar{e}_{i\text{пр}}$ – коэффициент вариации.

Путем сравнения (8.35) и (8.36) устанавливаем, что коэффициент запаса k в равенстве (8.35) принимает значение $k = 1 - V_{ei}$. В соответствии с выполненными статистическими исследованиями можно принимать при вытяжке с утонением значения коэффициента вариации $V_{ei} = 0{,}03 \ldots 0{,}04$.

Как известно из теории пластичности, в общем случае большую (конечную) деформацию частицы или части однородно деформируемого тела количественно определяют двумя численно различными характеристиками: степенью деформации e_i и интенсивностью деформации ε_i. Понятие о степени конечной деформации введено А. А. Ильюшиным и развито Г. А. Смирновым-Аляевым и предполагает реализацию двух условий: первое – полная производная степени деформации по времени равна интенсивности скорости деформации $\dot{\varepsilon}_i$ т.е. $de_i / dt = \dot{\varepsilon}_i$, откуда следует, что $e_i = \int_0^t \dot{\varepsilon}_i dt$; второе – равенство нулю в начальный момент процесса формоизменения значений степени деформации во всех точках деформируемого тела.

Использование понятия степени конечной деформации в технологических расчетах процессов холодной штамповки предполагает принятие допущений об однородности и монотонности процесса пластической деформации.

Для монотонных и приближенно монотонных процессов величина степени деформации принимается равной интенсивности деформации: $e_i = \varepsilon_i$ Немонотонные процессы разбиваются на отдельные стадии, в пределах которых деформацию можно считать приближенно-монотонной и степень деформации рассчитывается как сумма интенсивностей деформации по каждой стадии,

т.е. $e_i = \sum_{i=1}^{l} \varepsilon_{ii}$, где l – количество стадий; ε_{ii} – интенсивность деформации на i-й стадии. При этом будет справедливо равенство $e_{ii} = \varepsilon_{ii}$, где e_{ii} – степень деформации на i-й стадии. Расчетные формулы для определения интенсивности и, соответственно, степени деформации e_{ii} получают, анализируя деформированное состояние в процессах штамповки.

В технологических расчетах процессов вытяжки с утонением при вычислении степени деформации используются следующие показатели (меры деформации):

$$e_i^j = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{F_{i-1}^j}{F_i^j} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{1}{1-\psi_i^j}; \tag{8.37}$$

$$\psi_i^j = 1 - m_{di}^j \cdot m_{Si}^j = 1 - F_i^j \Big/ F_{i-1}^j; \tag{8.38}$$

$$m_{di}^j = d_{i\text{ср}}^j \Big/ d_{(i-1)\text{ср}}^j; \quad m_{Si}^j = S_i^j \Big/ S_{i-1}^j; \; e_i = \sum_{i=1}^{n} e_{ii}^j; \tag{8.39}$$

$$\left(1 - \psi_\Sigma^j\right) = \prod_{i=1}^{n} \left(1 - \psi_i^j\right); \; m_{d\Sigma}^j = \prod_{i=1}^{n} m_{di}^j; \quad m_{S\Sigma}^j = \prod_{i=1}^{n} m_{Si}^j. \tag{8.40}$$

Эти показатели характеризуют усредненную по любому сечению j-ю степень деформации и не учитывают неоднородность распределения деформации по толщине стенки протянутой заготовки. При необходимости оценки скорости деформации (среднеинтегрального значения) в ОПД при условии принятия гипотезы плоских сечений и допущений об однородности деформации и монотонности процесса можно воспользоваться следующим приближенным соотношением:

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{v \cdot \text{tg}\alpha}{(R_{i-1} - R_i)} \psi_i^j, \tag{8.41}$$

где v – скорость деформирования; R_{i-1}, R_i – наружный радиус заготовки до и после вытяжки; ψ_i^j – относительное изменение площади поперечного сечения j.

Для исследования предельных деформаций при вытяжке с утонением авторами применена схема натурных испытаний через одну или две матрицы (рис. 8.22,*а*). Опытные заготовки деформировали в универсальном штампе инструментом, имеющим форму, характерную для процесса вытяжки с утонением. В каждой опытной точке разрушение достигается последовательным подбором матриц с соответствующей величиной диаметра вытяжного пояска. Определение предельных деформаций основано на деформировании опыт-

ных заготовок до разрушения и последующем расчете степени деформации в месте разрушения. Степень предельной деформации рассчитывали по исходным размерам заготовки и ее размерам в месте разрыва. Сечение исходной заготовки, соответствующее месту разрыва, определяли по предварительно нанесенным кольцевым рискам (рис. 8.22,*б*,*в*), а исходные размеры – измерением в отмеченных сечениях толщины стенки заготовки S_0^j и наружного диаметра D_0^j. Толщину стенки в месте разрушения $S_р$ рассчитывали по измеренной толщине в некотором произвольном сечении S_1 и известному значению угла конусности внутренней поверхности разрушенной заготовки, соответствующему истинному углу конусности пуансона $\beta_п^{ист}$: $S_р = S_{1ср} - l \operatorname{tg} \beta_п^{ист}$, при l – расстоянии от произвольного сечения до места разрушения (рис. 8.22,*в*). Для расчета предельной до разрушения степени деформации используется формула $e_{ip} = 2/\sqrt{3} \cdot \ln F_0/F_р \cdot 100\%$, где $F_0 = \pi(D_0 - S_{0\,ср}^j)\, S_{0\,ср}^j$ – площадь поперечного сечения исходной заготовки, соответствующего месту разрушения; $F_р = \pi(D_0 - S_{р.ср}) S_{р.ср}$ – площадь поперечного сечения заготовки в месте разрушения.

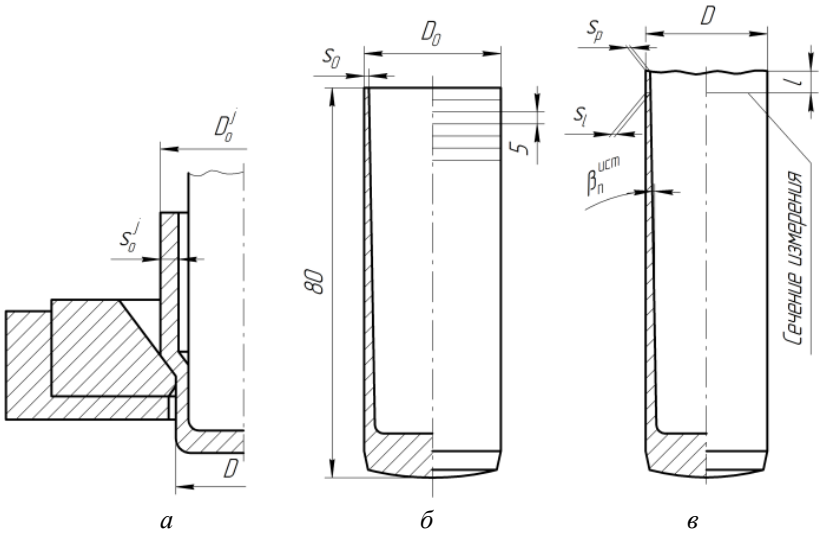


Рис. 8.22. Схема (*а*), заготовка до (*б*) и после (*в*) технологического испытания на пригодность к вытяжке с утонением

Опытные заготовки деформировали в штампе для вытяжки с утонением. При планировании экспериментов количество уровней и уровни факторов (табл. 8.3) выбраны на основании анализа результатов предварительно выполненных однофакторных и многофакторных экспериментов.

Таблица 8.3

Факторы и их уровни, принятые при исследовании предельной до разрушения деформации

Условия планирования	Степень деформации в верхней матрице	Степень предварительной деформации	Угол конусности пуансона	Угол конусности матрицы
Обозначение фактора	$e_{i\text{в}}$	e_{i0}	β	α
Символ фактора	x_1	x_2	x_3	x_4
Диапазон варьирования фактора	0 – 80%	0 – 80%	0,5° – 1,5°	5° – 25°
Число уровней	3	3	3	3
Значение среднего уровня	40%	40%	1,0°	15°

В качестве предполагаемой (постулируемой) модели принята модель, имеющая вид полинома 2-й степени:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_1^2 + b_6x_2^2 + b_7x_3^2 + b_8x_4^2 + b_9x_1x_2 + \\ + b_{10}x_1x_3 + b_{11}x_1x_4 + b_{12}x_2x_3 + b_{13}x_2x_4 + b_{14}x_3x_4.$$

Условия планирования при четырехфакторном исследовании позволяют выбрать стандартный план эксперимента из 16 опытных точек. Этот план был реализован на заготовках с относительной толщиной $S_{i-1}/d_{i-1}\cdot 100 = 7{,}2$ дважды с учетом изменения состояния материала.

С целью установления соотношения (8.36) выполнен статистический анализ опытных данных расширенных серий эксперимента по следующей методике.

Исходными полуфабрикатами для получения опытных заготовок служили заготовки, используемые при производстве полых деталей из стали 11ЮА, высотой 80 мм, диаметрами 48 и 41 мм, толщинами стенки в верхнем расчетном сечении 3,5 и 1,5 мм соответственно. Для обеспечения условия $e_{i0} = 0$ заготовки подвергали полному рекристаллизационному отжигу перед технологическим испытанием, перед вытяжкой – травлению, фосфатированию, омылению по действующей заводской технологии. Технологией так же предусматривалось проведение закалки при $t = 1000$ °С, $\tau = 4$ мин, с последующим отпуском при t=600°С, $\tau = 90$ мин. Для оценки воспроизводимости эксперимента в каждой точке плана проводилось по пять опытов, рассчитывалась построчная дисперсия, ошибка опыта. Проверка дисперсии по критерию Кохрена говорит об их однородности, о том, что ошибки опытов в различных точках плана различаются незначительно, т.е. опыты для различных точек плана воспроизводимы. Математическая обработка результатов экспериментов выполнена на ЭВМ.

Математические модели строились методом исключения на каждом шаге члена уравнения с минимальной значимостью. Коэффициенты модели определялись методом наименьших квадратов.

В результате обработки четырехфакторного плана получены математические модели следующего вида:

а) для отожженного состояния металла

$$e_{i\text{р}} = 146{,}9 + 0{,}81e_{i\text{в}} - 0{,}73e_{i0} - 110{,}63\beta + 2{,}20\alpha - 0{,}0051e^2_{i\text{в}} + \\ + 0{,}0063e^2_{i0} + 64{,}66\beta^2 - 0{,}0607\alpha^2 - 0{,}10e_{i\text{в}}\beta + 0{,}0073e_{i\text{в}}\alpha + \\ + 0{,}0486e_{i0}\beta + 0{,}004e_{i0}\alpha - 0{,}84\beta\alpha; \qquad (8.42)$$

б) для закаленного исходного состояния

$$e_{i\text{р}} = 130{,}5 + 0{,}44e_{i\text{в}} - 0{,}87e_{i0} - 65{,}41\beta + 1{,}53\alpha + 0{,}0066e^2_{i0} + \\ + 43{,}91\beta^2 - 0{,}0316\alpha^2 + 0{,}0012e_{i\text{в}}e_{i0} - 0{,}11e_{\text{в}}\beta + 0{,}007e_{i\text{в}}\alpha + \\ + 0{,}0723e_{i0}\beta + 0{,}0086e_{i0}\alpha - 1{,}06\beta\alpha. \qquad (8.43)$$

Статистическая оценка моделей, проведенная по сопоставлению расчетных значений коэффициентов Фишера с их табличными (критическими) значениями, показала, что все модели значимы и адекватны. На основании рассчитанных статистических параметров расширенных серий опытов установлен интервал изменения коэффициента вариации v=0,03...0,04 (вероятность P=0,997). С учетом статистического критерия допустимая степень деформации $e_{i\text{доп}}$ будет определяться соотношением $e_{i\,\text{доп}} \le (0{,}88\ldots0{,}91)\overline{e}_{i\,\text{р}}$, где $\overline{e}_{i\text{р}}$ – среднее выборочное значение предельной деформации.

На основании анализа математических моделей (8.42), (8.43) установлены следующие основные закономерности.

1. С изменением степени предварительной деформации e_{i0} (рис. 8.23) предельная до разрушения деформация изменяется неоднозначно, минимум функции $e_{i\text{р}} = e_{i\text{р}}(e_{i0})$ отвечает интервалу e_{i0} = 0,50...0,60 для отожженного и e_{i0}=0,45...0,65 для закаленного состояний исходного материала. При этом с уменьшением e_{i0} от указанных значений наблюдается более интенсивный рост $e_{i\text{р}}$, чем при увеличении от точки экстремума, а с увеличением $e_{i\text{в}}$ точка экстремума смещается в сторону больших значений e_{i0}.

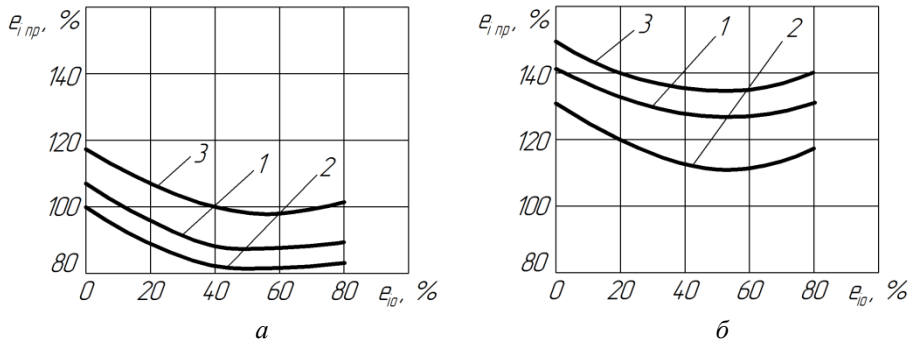
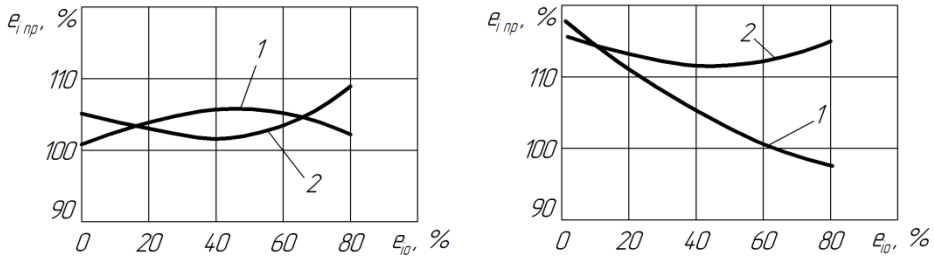


Рис. 8.23. Влияние степени предварительной деформации e_{i0} ($e_{i\text{в}}$ = 40%, α = 8°) на предельную до разрушения деформацию стали 11ЮА после закалки (*а*) и отжига (*б*): *1* – β=0,5°; *2* – β=1°; *3* – β=1,5°

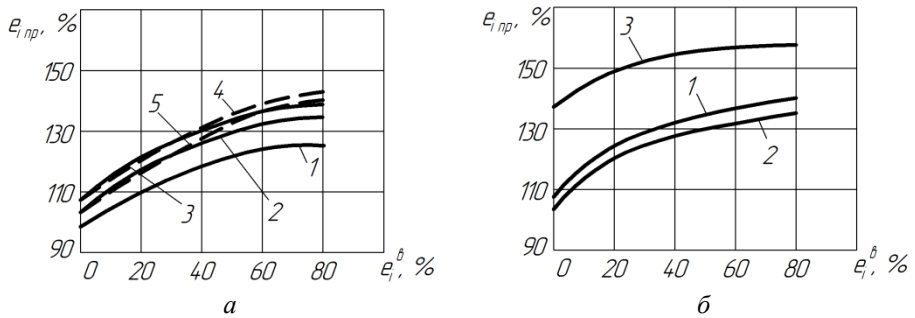
Для заготовок без предварительной деформации $e_{i0} = 0$ применение двух вытяжных матриц в некоторых случаях привело к уменьшению предельной деформации. Могли сказаться эффект потери устойчивости (высадки) части заготовки в межматричном пространстве, увеличение ее поперечных размеров и, как следствие, увеличение действительной степени деформации. Причем этот эффект гораздо интенсивнее проявляется на относительно "тонких" заготовках (S_0/D 100 = 3,6%). Логически оправданна картина испытаний сильно наклепанных заготовок. Здесь устойчивость кольцевого участка между матрицами значительно выше и применение двух вытяжных матриц позволяет увеличить предельную степень деформации особенно интенсивно при штамповке относительно "толстых" заготовок (S_0/D 100 = 7,2%). При вытяжке через одну матрицу значительный предварительный наклеп ведет к снижению e_{ip} (рис. 8.24) "толстых" заготовок (S_0/D 100 = 7,2%).



а *б*

Рис. 8.24. Влияние степени предварительной деформации e_{i0} и относительной толщины заготовки на e_{ip} (сталь 11ЮА): *а* – $S/d_{-1}^{100} = 3{,}6$; *б* – $S/d_{-1}^{100} = 7{,}2$;
1, *2* – вытяжка через одну и две матрицы

2. С увеличением степени деформации в верхней матрице $e_{iв}$ значение e_{ip} возрастает, при этом для отожженного состояния наиболее интенсивно при невысоких значениях $e_{iв}$ (до 0,40), для закаленного состояния – при $e_{iв} > 0{,}3$ (рис. 8.25).



а *б*

Рис. 8.25. Зависимость e_{ip} от $e_{iв}$ для отожженной стали 11ЮА (e_{i0}=40%) при β=0,5° и различных углах конусности матрицы α (*а*) (*1* – 5°; *2* – 10°; *3* – 15°; *4* – 20°; *5* – 25°), при α=8° и различных углах конусности β (*б*) (*1* – 1°; *2* – 0,5°; *3* – 1,5°)

3. Влияние угла конусности матрицы на $e_{i\text{р}}$ в общем случае неоднозначно и характеризуется наличием максимума функции $e_{i\text{р}} = e_{i\text{р}}(\alpha)$ при $\alpha = 5°...8°$ для отожженного и $\alpha = 12°...20°$ для закаленного состояния. Экстремум функции $e_{i\text{р}} = e_{i\text{р}}(\alpha)$ для закаленного состояния смещается в сторону больших значений α с увеличением $e_{i\text{р}}$, более интенсивное изменение $e_{i\text{р}}$ характерно для отожженного материала (рис. 8.26).

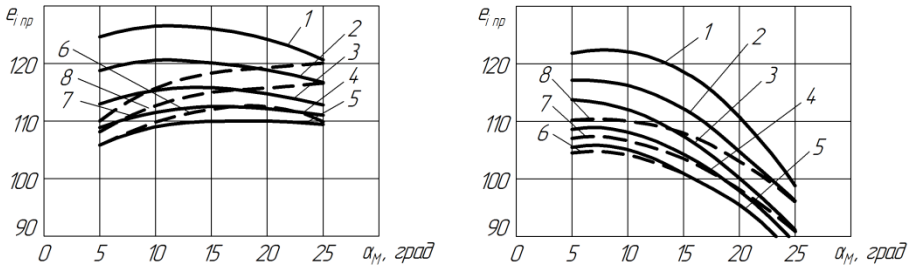


Рис. 8.26. Зависимость $e_{i\text{р}}$ от α ($\beta=1^{\circ}$; $e_{i\text{в}}=40\%$) стали 11ЮА после закалки (*а*) и отжига (*б*) при e_{i0}: *1* – 0%; *2* – 10%; *3* – 20%; *4* – 30%; *5* – 40%; *6* – 50%; *7* – 60%; *8* – 70%

4. Влияние угла конусности пуансона β на $e_{i\text{р}}$ также неоднозначно и характеризуется наличием минимума функции $e_{i\text{р}} = e_{i\text{р}}(\beta)$ при $\beta=1^{\circ}$, наибольшие значения $e_{i\text{р}}$ при $\alpha= 5°...18°$ соответствуют значению $\beta = 1^{\circ}\,30'$.

5. При переходе от отожженного к закаленному состоянию $e_{i\text{р}}$, как правило, возрастает.

Установленные закономерности влияния технологических факторов на предельную деформацию требуют дальнейшего исследования в части уточнения физико-механической природы процесса. Например, не вполне ясны причины повышения $e_{i\text{р}}$ с повышением e_{i0} при переходе через экстремальные значения функции $e_{i\text{р}} = e_{i\text{р}}(e_{i0})$. Можно предположить, что при степени предварительной деформации $e_{i0} > e^{*}_{i0}$, где e^{*}_{i0} соответствует точке экстремума, проявляется тепловой эффект пластической деформации и частичное разупрочнение металла заготовки в процессе вытяжки. При вытяжке через две матрицы с увеличением $e_{i\text{в}}$ значение e^{*}_{i0} несколько уменьшается, что согласуется с представлением о накоплении критической величины поглощенной энергии деформации, заметно изменяющей условия термодинамического равновесия. Представляет интерес выявление оптимального распределения степеней деформации в верхней ($e_{i\text{в}}$) и нижней ($e_{i\text{н}}$) матрицах. Результаты исследования отожженных заготовок свидетельствуют о затухании интенсивности роста $e_{i\text{р}}$ с повышением $e_{i\text{в}}$, при этом эстремум кривой $e_{i\text{р}} = e_{i\text{р}}(e_{i\text{в}})$ соответствует $e_{i\text{в}} \approx 0{,}60e_i = 0{,}60e_{i\text{р}}$.

Аналогичные модели получены и для стали 18ЮА (для отожженного состояния):

а) вытяжка через одну матрицу

$$e_{ip} = 97 + 1{,}65e_{i0} - 2{,}47\alpha - 3{,}27\beta + 0{,}016e_{i0}\alpha - 0{,}028(e_{i0})^2 + 0{,}023\,\alpha^2 + 3{,}0S^2_0. \quad (8.44)$$

Пределы изменения параметров в модели: $e_{i0} = 0\ldots50\%$;

$$\alpha = 5^{o}\ldots25°;\ \beta = 0{,}5^{o}\ldots1{,}0°;\ S_0 = 2{,}6\ldots3{,}6\ \text{мм};$$

б) вытяжка через две матрицы

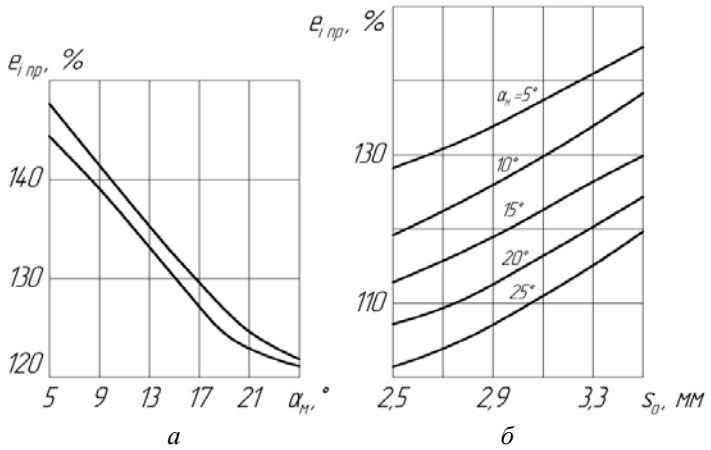
$$e_{ip} = 140{,}5 + 1{,}07e_{iв} - 0{,}47\alpha^{в} + 0{,}17\,\alpha^{н} - 0{,}011(e_{iв})^2. \quad (8.45)$$

Пределы изменения параметров в модели: $e_{iв} = 10\ldots100\%$;

$$\alpha^{в} = 3°\ldots25°;\ \alpha^{н} = 3°\ldots25°.$$

Анализ результатов исследования показал, что при вытяжке через одну матрицу разрушение заготовок, деформируемых в предельных условиях, происходит, как правило, по нижней границе очага деформации. Увеличение толщины стенки заготовки приводит к заметному росту предельной деформации (до 30%), а увеличение угла конусности матрицы – к ее уменьшению (рис. 8.27).

Угол конусности пуансона β на e_{ip} влияет несущественно. В отличие от стали 11ЮА для стали 18ЮА максимальное (экстремальное) значение предельной деформации отвечает интервалу значений предварительной деформации $e_{i0} = 30...40\%$. При отклонении от этих значений в большую и меньшую сторону e_{ip} уменьшается. При вытяжке через две матрицы предельная деформация возрастает. Увеличение степени деформации в верхней матрице (до 50...60%), так же как и для стали 11ЮА, повышает предельную до разрушения деформацию, а при дальнейшем увеличении $e_{iв}$ снижает ее.



а *б*

Рис. 8.27. Зависимость предельной до разрушения степени деформации e_{ip} стали 18ЮА при вытяжке с утонением через одну матрицу (β=1°; e_{i0}=30%) от угла конусности матрицы α (S_0=3,5мм) (*а*) и толщины исходной заготовки S_0 (*б*)

8.6. Технологические требования, предъявляемые к конструкции штампуемых деталей

Под технологичностью конструкции детали (заготовки), получаемой вытяжкой, следует понимать степень её пригодности к изготовлению способами вытяжки с утонением за наименьшее число операций при обеспечении основных условий ограничения деформации (подразд. 8.5) и заданного уровня качества штампуемой детали (заготовки).

Основными техническими показателями технологичности конструкции детали являются штампуемость исходного материала степень геометрической сложности и степень сложности физико-механических свойств материала детали.

Основные характеристики штампуемости – сопротивление материала деформированию ($\sigma_{0,2}$ ($\sigma_т$), $\sigma_в$), способность материала к деформационному упрочнению n, $(\sigma_{0,2}/\sigma_в)$, предельная до разрушения интенсивность деформации ε_{ip}, определяемая по результатам испытания образцов на растяжение, а также относительное сужениеψ, предельная до разрушения степень дефо рмации при вытяжке с утонением e_{ip} .

Для выявления конструктивно-технологических параметров, определяющих технологичность конструкции изделия, рассмотрим модель вытягиваемой детали в виде полого цилиндра с переменной толщиной стенки и дном. В соответствии с особенностями протекания процесса вытяжки с утонением дно и придонный участок формируются на первых двух нестационарных стадиях процесса, а стенка – на третьей стационарной стадии. На этом основании и с учетом условий геометрического и физико-механического подобия, рассмотренных при разработке технологического классификатора, сформируем состав конструктивно-технологических параметров (КТП) модели детали: *а*) геометрические безразмерные $(C^к_{\delta г})_n$; *б*) размерные геометрические $(C^к_{рг})_n$; *в*) физико-механические $(C^к_{фм})_n$. Выделенные три группы КТП в совокупности формируют вектор КТП:

$$C^к_n = \{ (C^к_{\delta г})_n, (C^к_{рг})_n, (C^к_{фм})_n \}. \qquad (8.46)$$

В группу безразмерных КТП $(C^к_{\delta г})_n$ входят относительные размеры: относительная высота стенки $(H_n–S^д_n)/d_n$; относительная толщина дна $S^д_n/d_n$; относительная толщина стенки в заданном расчетном сечении j, S^j_n/d_n; относительный радиус сопряжения стенки и дна $r_n/ S^д_n$; допускаемая относительная разностенность δ_s; допустимый угол конусности внутренней поверхности β.

К группе размерных геометрических параметров относятся габаритные размеры детали: полная высота H_n, наружный диаметр d_n, толщина стенки в верхнем расчетном сечении $S^{в}_{n}$, толщина дна $S^{д}_{n}$.

Физико-механические свойства материала готовой детали характеризуются типом формируемой структуры металла по величине зерна и показателями его относительного упрочнения $\sigma_{вп}/\sigma_{в0}$, HV_n/HV_0, где $\sigma_{вп}$, HV_n, $\sigma_{в0}$, HV_0 – соответственно значения характеристик механических свойств после вытяжки и в отожженном состянии.

Граничные значения безразмерных геометрических параметров могут быть установлены из анализа условий ограничения деформации при вытяжке с утонением (подразд. 8.5).

Основным условием ограничения деформации является условие обеспечения продольной прочности стенки заготовки на стационарной стадии: $\omega_i \le [\omega_i]$ $\omega_i \le \left[\omega_i\right]$, где ω_i, $[\omega_i]$ – коэффициент использования запаса (ресурса) пластичности металла деформируемой заготовки и его допустимое значение соответственно;

$$\omega_i = (e_{ii}/e_{i\text{p}})^a\,,\ [\omega_i] = ([e_{ii}]/e_{i\text{p}})^a\,, \tag{8.47}$$

где $[e_{ii}]$ – допустимое значение степени деформации при заданном $[\omega_i]$.

Допустимое значение степени деформации будет равно:

$$\left[e_{ii}\right] = \left[\omega_i\right]^{1/a} \cdot e_{i\text{p}}\,. \tag{8.48}$$

В то же время из анализа деформированного состояния при вытяжке с утонением следует:

$$\left[e_{ii}\right] = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln\left[\frac{F_{i-1}}{F_i}\right], \tag{8.49}$$

где $\left[F_{i-1}/F_i\right]$ – допустимое отношение площадей поперечного сечения заготовки до F_{i-1} и после F_i вытяжки.

Из условия приближенного равенства объемов стенки заготовки до и после вытяжки

$$\frac{F_{i-1}}{F_i} = \frac{h_i}{h_{i-1}} = \frac{\overline{h}_i}{\overline{h}_{i-1}} m_{d_i}\,, \tag{8.50}$$

где $\overline{h}_i = h_i/d_i$; $\overline{h}_{i-1} = h_{i-1}/d_{i-1}$; $m_{d_i} = d_i/d_{i-1}$.

После совместного решения уравнений (8.48)–(8.50) определим величину допустимой относительной глубины вытяжки:

$$\left[\bar{h}_i\right] \le \bar{h}_{i-1}\frac{1}{m_{d_i}}\exp\left\{\frac{\sqrt{3}}{2}\left[\omega_i\right]^{1/a} e_{i\text{p}}\right\}, \qquad (8.51)$$

где $\bar{h}_{i-1}$ – относительная высота заготовки, поступающей на вытяжку; $e_{i\text{p}} = e_{i\text{p}}\left(e_{i0}, \alpha, \beta, e_{i\text{в}}\right)$ – предельная до разрушения степень деформации при вытяжке (в виде функции отклика многофакторной модели); $e_{i0}, \alpha, \beta, e_{i\text{в}}$ – степень предварительной деформации, углы конусности матрицы и пуансона, степень деформации в верхней матрице.

При подстановке в (8.51) вместо величины $e_{i\text{p}}$ известного соотношения $e_{i\text{p}} = 2\varepsilon_{i\text{p}}\exp\left(-0{,}72K\right)$, получим формулу для приближенной оценки уровня технологичности по параметрам допустимой относительной высоты, показателю штампуемости материала $\varepsilon_{i\text{p}}$ и допустимому значению коэффициента использования ресурса пластичности $[\omega_i]$, т.е.

$$\bar{h}_i \le \left[\bar{h}_i\right] = 2\frac{\bar{h}_{i-1}}{m_{di}}\exp\left\{\sqrt{3}\left[\omega_i\right]^{\frac{1}{a}}\varepsilon_{i\text{p}}\exp\left(-0{,}72K\right)\right\}. \qquad (8.52)$$

На рис. 8.28 в качестве примера показана графическая иллюстрация рассчитанных по формуле (8.52) трех областей ТКИ по показателю относительной высоты $\bar{h}_i$ при двух принятых критических уровнях поврежденности металла, отвечающих допустимым коэффициентам $[\omega_i]_1 = 0{,}25$ и $[\omega_i]_1 = 0{,}65$ и заданным значениям $\varepsilon_{i\text{p}} = 0{,}89$ и $K = 0{,}55$ ($a = a_0^{1+0{,}14K}$, $a_0 = 2{,}4$). Таким образом, может быть дана оценка из условия продольной прочности вытягиваемой заготовки трех уровней ТКИ по параметру $\bar{h}_i$: высокого, среднего, низкого. На основании анализа основных условий ограничения деформации и производственных данных установлены контрольные уровни показателей для оценки ТКИ, изготавливаемых вытяжкой с утонением (табл. 8.4).

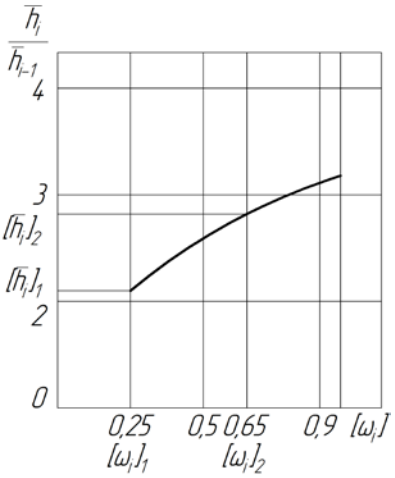


Рис. 8.28. Графическая интерпретация условия (8.51)

Таблица 8.4

Контрольные уровни показателей ТКИ заготовок и деталей, изготавливаемых способами вытяжки с утонением

Наименование группы показателей ТКИ	Вид показателя ТКИ	Уровень технологичности		
		Высокий	Средний	Низкий
Расход материала	Коэффициент использования металла η, %	Более 90	75…90	Менее 75
Штампуемость материала	Сопротивление материала деформированию:			
	предел текучести $\sigma_{0,2}(\sigma_т)$, МПа	Менее 200	200…350	Более 350
	временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	Менее 320	320…600	Более 600
	Способность к деформационному упрочнению n	Более 0,25	0,25…0,15	Менее 0,15
	Предельная до разрушения пластичность:			
	ε_{ip} Ψ	Более 1,05 Более 0,65	1,05…0,80 0,65…0,55	Менее 0,80 Менее 0,55
Сложность геометрической формы	Общая форма детали	Одноступенчатая цилиндрическая	Коническая многоступенчатая	Неосесимметричная
	Высота детали H, мм	Менее 100	100…500	Более 500
	Диаметр детали D, мм	Менее 28	28…100	Более 100
	Относительная высота стенки детали H/D	Менее 2	2…3	Более 3,0
	Относительная толщина дна $S^д/D$	Менее 0,2	0,2…0,4	Более 0,4
	Относительный радиус сопряжения стенки и дна по внутренней поверхности $r_c/ S^д$	0,5…0,8	0,3…0,5	Менее 0,3
	Перепад толщины дна и стенки $S^д/S^н$	Более 5,0	5,0…3,0	Менее 3,0
	Допустимые отклонения по диаметру δ_d, %	Более 0,25	0,25…0,10	Менее 0,10
	Допустимая разностенность δ_S, %	Более 40	40…10	Менее 10
	Допускаемая разновысотность $\delta_н$, %	Более 10	10…15	Менее 5
Сложность механических свойств	Степень упрочнения $\sigma_в/\sigma_{в0}$, HV/HV_0	Менее 1,7	1,7…1,9	Более 1,9

8.7. Качество деталей, изготавливаемых вытяжкой

Критерием качества отштампованных деталей служат их размерно-геометрические характеристики: продольная, поперечная разнотолщинность и разностенность:

$$\delta_{S\text{пр}} = \Delta S_{\text{пр}} / S \cdot 100\%,\ \delta_{S\text{пп}} = \Delta S_{\text{пп}} / S_j \cdot 100\%,\ \delta_S^j = \Delta S_{\max}^j / S \cdot 100\%,$$

где $\Delta S_{\text{пр}} = S^{\text{в}} - S^{\text{н}}$ – абсолютная продольная разнотолшинность; $\Delta S_{\text{пп}} = S_{\text{вп}} - S_{\text{ф}}$ – абсолютная поперечная разнотолщинность; $\Delta S^j_{\max}=S^j_{\max}-S^j_{\min}$ – абсолютная разнотолщинность в контролируемом сечении j; $S^{\text{в}}$ – толщина стенки края детали; $S^{\text{н}}$ – толщина стенки в месте сопряжения с дном в установленном контрольном сечении "н"; $S_{\text{вп}}$, $S_{\text{ф}}$ – толщина края вытянутой детали по впадине и фестону соответственно; $S^j_{\max}$, $S^j_{\min}$– максимальная и минимальная толщина стенки детали в сечении j.

Параметры $\Delta S_{\text{пр}}$ и $\Delta S_{\text{пп}}$ для анизотропных материалов могут иметь значительную величину и при отсутствии разностенности ($\Delta S_{\max} = 0$). Последнее связано с образованием на кромке фестонов. У изотропных материалов $\Delta S_{\text{пп}} = 0$. У полых деталей с колебаниями размеров по толщине тесно связаны также погрешности формы:

- разновысотность (косина)

$$\delta_{\text{н}} = \Delta H_{\max} / H \cdot 100\%;$$

- огранка

$$\delta_{\text{огр}} = \Delta_{\text{огр}} / d \cdot 100\%; \qquad (8.53)$$

- овальность

$$\delta_d^j = \Delta d_{\max}^j / d^j \cdot 100\%,$$

где $\Delta H_{\max}=H_{\max}-H_{\min}$ – абсолютная разновысотность; $\Delta_{\text{огр}} = (d^{\text{кр}}_{\max} - d^{\text{кр}}_{\min})/2$ – абсолютная некруглость кромки; $\Delta d^j_{\max} = d^j_{\max} - d^j_{\min}$ – абсолютная овальность в контролируемом сечении j; $H_{\max}$, $H_{\min}$ – максимальная и минимальная высота протянутой заготовки; $d^{\text{кр}}_{\max}$, $d^j_{\max}$, $d^{\text{кр}}_{\min}$, $d^j_{\min}$ – максимальные и минимальные диаметры.

Математическое описание погрешностей толщины стенки δ_S^j и формы δ_d^j и определение доминирующих факторов, в наибольшей степени влияющих на точность деталей типа корпусов, изготавливаемых вытяжкой, представляется по-прежнему актуальной задачей ввиду недостаточной информации. Абсолютная разностенность $\Delta S^j_{\max}$ рассматривается как оценка среднеквадрати-

ческого отклонения $S_{\delta S}$: $\Delta S^{j}_{\max} = \alpha_N S^{j}_{\delta S}$, где α_N – табулированная функция, зависящая от объема N контрольной выборки.

Процесс вытяжки представляют как сложную преобразующую систему, входами которой являются размерно-геометрические и физико-механические характеристики исходной полой заготовки, показатели точности настройки и параметры режима обработки, выходными параметрами считают погрешность формы стенки, т.е.

$$y_1 = S^{j}_{\delta S} = \sqrt{1/(N-1)\cdot \sum_{i=1}^{N} \left(S_i^{j} - \overline{S}^{j}\right)^2}$$

и "колеблемость" средней толщины стенки

$$y_2 = \left(S^{j} - S^{j}_{\text{н}}\right) / S^{j}_{\text{н}} \cdot 100\%,$$

где $\overline{S}^{j} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} S_i^{j}$ – средняя толщина стенки; S^{j}_i – толщина стенки, определенная при i-м измерении; $S^{j}_{\text{н}}$ – надстроечная толщина стенки; N – объем контрольной выборки.

Входные переменные (факторы) вытяжки, определенные на основе общих положений теории точности производства, можно разбить на три группы:

1) факторы, характеризующие качество исходной заготовки:
   - средняя толщина стенки $\overline{S}^{j}_{i-1}$;
   - разностенность $\Delta S^{j}_{i-1\max}$; δ^{j}_{Si-1};
2) факторы, характеризующие технологию подготовки исходной заготовки:
   - степень предшествующей деформации e_{i0};
   - режим предшествующей термообработки ($t_{i\text{-}1}$, $\tau_{i\text{-}1}$);
3) факторы настройки инструмента:
   - эксцентриситет осей матрицы и пуансона;
   - угол между направлением движения пуансона и осью матрицы;
   - угол между направлением движения пуансона и осью пуансона;
4) факторы, характеризующие условия вытяжки:
   - количество матриц;
   - величина деформации в верхней матрице (в каждой из предшествующих матриц) $e_{i\text{в}}$;
   - величина общей суммарной деформации $e_{i\Sigma} = \sum_{i=1}^{n_{\text{м}}} e_{ii}$;
   - угол конусности матриц α;
   - вид смазки.

По результатам исследований наиболее значимыми оказались разностенность исходной заготовки, перекос вытяжной матрицы, степень деформации e_i и вид смазки, а также совместное влияние двух факторов: средней толщины стенки исходной заготовки и времени τ выдержки заготовки при предшествующей термообработке.

На основании изложенного за показатели качества приняты разностенность δ_S^j и овальность δ_d^j. Но поскольку обеспечить точно заданные их значения затруднительно, за функции отклика приняты отношения разностенностей и овальностей: $\delta_{Si}^j / \delta_{Si-1}^j$ и $\delta_{di}^j / \delta_{di-1}^j$, что исключает необходимость в дополнительной токарной обработке исходных заготовок.

При постановке экспериментов предусматривалось исследование влияния выделенных выше факторов 1-, 2- и 4-й групп на показатели качества, которые должны учитываться при технологическом проектировании.

Использовалась методика планируемого многофакторного эксперимента, позволяющая получить математические модели показателей точности, учитывающие влияние технологических факторов.

Откликами или функциями зависимости, характеризующими точность и качество штампованных деталей, являются относительная разностенность $\delta S_1 / \delta S_0$ и относительная овальность $\delta D_1 / \delta D_0$. Показатели точности (качества) детали определялись по формулам

$$\delta S_1 = \left(S^1_{\max} - S^1_{\min}\right) / S^1_{\text{ср}};\ \delta D_1 = \left(D^1_{\max} - D^1_{\min}\right) / D^1_{\text{ср}};$$

$$\delta S_0 = \left(S^0_{\max} - S^0_{\min}\right) / S^0_{\text{ср}};\ \delta D_0 = \left(D^0_{\max} - D^0_{\min}\right) / D^0_{\text{ср}},$$

где $S^1{}_{\max}$, $S^1{}_{\min}$ ($S^0{}_{\max}$, $S^0{}_{\min}$) – максимальная и минимальная толщины стенки детали и заготовки соответственно; $D^1{}_{\max}$, $D^1{}_{\min}$ ($D^0{}_{\max}$, $D^0{}_{\min}$) – максимальный и минимальный наружные диаметры детали (заготовки).

Технологические факторы, выбранные для исследования, следующие: e_{i0} – степень предварительной деформации заготовки; $e_{iв}$ – степень деформации при вытяжке с утонением в верхней матрице; $\beta_п$ – угол конусности пуансона; α – угол конусности матрицы.

Диапазон изменения исследуемых факторов установлен на основании анализа литературных и опытных данных.

Для проведения исследования четырех факторов, варьируемых на трех уровнях каждый, выбран план эксперимента из 16 опытных точек (табл. 8.5). Этот план использован по двойному назначению: для исследования предельных до разрушения деформаций и показателей точности процесса вытяжки. Поэтому модели показателей точности соответствуют предельным до разрушения деформациям.

Таблица 8.5

Исследуемые факторы и уровни

Условия планирования	Фактор			
Обозначение фактора	$e_{iв}$, %	e_{i0}, %	$\beta_п$, °	$\alpha_м$, °
Символ фактора	x_1	x_2	x_3	x_4
Диапазон изменения	0…80	0…80	0,5…1,5	5…25
Значение среднего x уровня фактора	40	40	1,0	15
Количество уровней варьирования	3	3	3	3

Связь между кодированными и натуральными значениями факторов осуществляется по формуле $X_i = (x_i - x_{i0})/\Delta x_i$, где X_i и x_i – кодированные и натуральные значения факторов, Δx_i – интервал варьирования вектора, т.е. для каждого фактора кодированному значению X_i= –1 соответствует минимальное значение фактора $x_{i\ min}$, значению X_i= +1 – максимальное значение $x_{i\ max}$, значению X_i = 0 – значение среднего (нулевого) уровня фактора x_{i0} (см. табл. 8.5).

В рассматриваемом исследовании предлагаемой для построения модели зависимостью является полином 2-й степени типа

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \ldots + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \ldots + b_{11}x_1^2 + \ldots + b_{44}x_4^2 .$$

Исследование выполнено на полых заготовках из стали 11ЮА, предварительно отожженных или закаленных. В качестве заготовок использовали полуфабрикаты свертки с S_0 = 3,5 мм.

Деформирование опытных заготовок проведено в универсальном вытяжном штампе. Рабочий инструмент представлен набором матриц и пуансонов с геометрическими параметрами, указанными в плане эксперимента (табл. 8.6). Перед испытанием на вытяжку исходные заготовки подвергались рекристаллизационному отжигу при t = 780°С с последующим травлением, промывкой и нанесением фосфатного покрытия (одна группа) или закалке при T=1000°С в соляных ваннах и с последующим высокотемпературным отпуском при T = 600°С (другая группа).

Для деформирования опытных заготовок применялся листоштамповочный кривошипный механический пресс двойного действия модели К-480.

Опытные заготовки подвергали вытяжке через одну ($e_{iв}$ = 0) или две матрицы в соответствии с планом эксперимента (см. табл. 8.6).

Таблица 8.6

План эксперимента для исследования качества (точности) штампованных деталей

№ опыта	Обозначение и величина фактора			
	$x_1(e_{iв})$	$x_2(e_{i0})$	$x_3(\beta_п)$	$x_4(\alpha_м)$
1	–1	+1	+1	+1
2	+1	–1	+1	+1
3	+1	+1	–1	+1

Окончание табл. 8.6

№ опыта	Обозначение и величина фактора			
	$x_1(e_{i\text{в}})$	$x_2(e_{i0})$	$x_3(\beta_\text{п})$	$x_4(\alpha_\text{м})$
4	+1	+1	–1	–1
5	+1	–1	+1	–1
6	–1	–1	–1	+1
7	–1	–1	–1	–1
8	0	+1	+1	–1
9	–1	0	+1	–1
10	–1	+1	0	–1
11	+1	–1	–1	0
12	–1	+1	–1	0
13	–1	–1	+1	0
14	+1	+1	+1	0
15	0	0	0	0
16	0	+1	–1	+1

Размеры исходной заготовки определяли измерением толщины стенки заготовки S_0 и наружного диаметра D_0 в сечениях, отмеченных кольцевыми рисками на наружной цилиндрической поверхности исходной заготовки, расположенными на расстоянии 5 мм друг от друга по высоте. Размеры детали после вытяжки определялись измерением толщины стенки в сечении (S_1), отмеченном риской, ближайшем к сечению, где произошло разрушение, и наружного диаметра в этом же сечении – D_1.

Толщины стенок заготовок до и после вытяжки измерялись с погрешностью ±0,01 мм, а диаметры – с погрешностью ±0,05 мм.

Для оценки воспроизводимости эксперимента в каждой точке плана проводили по три опыта, поэтому реализованные матрицы планирования имеют по 48 строк. По каждой строчке реализованной матрицы планирования рассчитывалась построчная дисперсия S_i^2, ошибка опыта S_y. Дисперсии проверялись на однородность по критерию Кохрена. Проверка показала, что для всех матриц опыты по строкам однородны и воспроизводимы, что позволяет использовать их для построения многофакторных моделей.

В результате математической обработки реализованных матриц планирования с помощью ЭВМ были построены следующие математические модели:

а) для отожженной стали 11ЮА зависимость относительной разностенности от технологических параметров имеет вид

$$Y_1 = \delta S_1/\delta S_0 = 3{,}9 - 0{,}06e_{i\text{в}} - 0{,}18\alpha + 0{,}02e_{i\text{в}}\beta + 0{,}0008e_{i\text{в}}\,\alpha + \\ + 0{,}0007e_{i0}\,\alpha + 0{,}0004e_{i\text{в}}^{\,2} - 0{,}0001e_{i0}^{\,2} - 0{,}391\beta^2 + 0{,}0024\alpha^2; \qquad (8.54)$$

$$Y_2 = \delta D_1/\delta D_0 = -1{,}8 + 7{,}46\beta + 0{,}04\alpha + 0{,}00013e_{i\text{в}}e_{i0} - \\ - 0{,}00046e_{i0}\,\alpha - 3{,}6727\,\beta^{\,2}; \qquad (8.55)$$

б) для закаленной стали 11 ЮА

$$Y_3 = \delta S_1/\delta S_0 = 0{,}97 - 0{,}034e_{i\text{в}} + 0{,}010e_{i0} + 1{,}287\beta + \\ + 0{,}00054e_{i\text{в}}\alpha - 0{,}0062e_{i0}\beta - 0{,}052\beta_\text{п}\alpha + 0{,}00032e_{i\text{в}}^{\,2}; \qquad (8.56)$$

$$Y_4 = \delta D_1/\delta D_0 = 0{,}8 - 0{,}039e_{i\text{в}} + 0{,}22\alpha + 0{,}0001e_{i\text{в}}e_{i0} + 0{,}0103e_{i\text{в}}\alpha +$$
$$+ 0{,}0008e_{i\text{в}}\alpha + 0{,}00023e_{i\text{в}}{}^2 + 0{,}00015e_{i0}{}^2 - 0{,}26\beta^2 - 0{,}0088\alpha^2. \qquad (8.57)$$

Статистическая оценка показала, что все приведенные модели значимы и адекватны.

Основные характеристики качества моделей приведены в табл. 8.7.

Таблица 8.7

Характеристики качества приведенных матаматических моделей

Характеристики качества	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
Остаточная дисперсия $S^2_{\text{ост}}$	0,15	0,18	0,18	0,29
Доля объясненной версии R^2, %	79,4	50,0	57,3	70,3
Стандартная ошибка, % от среднего отклика S_y	22,9	25,2	26,4	29,5
Совокупный коэффициент корреляции η	0,89	0,71	0,76	0,84

Остаточная дисперсия $S^2_{\text{ост}}$ характеризует долю неучтенных отклонений откликов y_i, рассчитанных по уравнению регрессии (модели), от экспериментальных. Как видно из табл. 8.7, она невелика.

Доля объясненной вариации R^2 показывает, насколько полученная модель определяется совокупностью выбранных для исследования факторов. Для всех моделей $R^2 \geq 50$ %, что говорит о достаточно правильном выборе.

Относительная стандартная ошибка $S_y = 22$–30% характеризуется достаточно большой величиной разброса измеряемых параметров качества относительной разностенности и овальности – от нулевых до максимальных в конкретных случаях и при практическом применении процесса вытяжки значениях.

Коэффициент совокупной корреляции R^2 находится в пределах от 0,7 до 0,9, что подтверждает тесную связь исследуемых технологических факторов и показателей качества.

На основании анализа качества моделей можно рекомендовать их для практического использования.

Из анализа уравнений (8.54)…(8.57) и построенных на их основе зависимостей (рис. 8.29–8.31) следует, что наибольшее влияние на разностенность и овальность оказывают: степень предварительной деформации e_{i0}, $e_{i\text{в}}$ – степень деформации в верхней матрице и α – угол конусности вытяжной матрицы.

С увеличением e_{i0} (рис. 8.29) для отожженного и закаленного состояний материала исходной заготовки относительная разностенность $\delta S_1/\delta S_0$ возрастает от 1,0…2,0 до максимальных значений 1,8...2,3. Это означает, что в результате вытяжки разностенность по сравнению с исходной увеличивается. При этом меньшее увеличение характерно для закаленного состояния материала, что может быть объяснено формированием в результате предварительной деформации и термообработки более благоприятной для пластической деформации структуры металла. Для отожженного состояния e_{i0} = 50...55% соответствует точке экстремума. На относительную разностенность значительное влияние оказывает режим вытяжки: величина деформации в верхней матрице $e_{i\text{в}}$ и угол конусности матрицы α. Влияние $e_{i\text{в}}$ неоднозначно (рис. 8.30, 8.31), что свидетельствует о наличии его оптимального значения, при котором относительная разностенность будет наименьшей. Оптимальное значение $e_{i\text{в}}$ при всех условиях вытяжки примерно одинаково и равно: $(e_{i\text{в}})_{\text{оп}}$ = 30...40%. При этом нижние значения отвечают отожженному состоянию, а верхние – закаленному. При варьировании других условий $\delta S^j_1/\delta S^j_0 < 1{,}3$. Отклонение от оптимальных значений $e_{i\text{в}}$ приводит к росту разностенности.

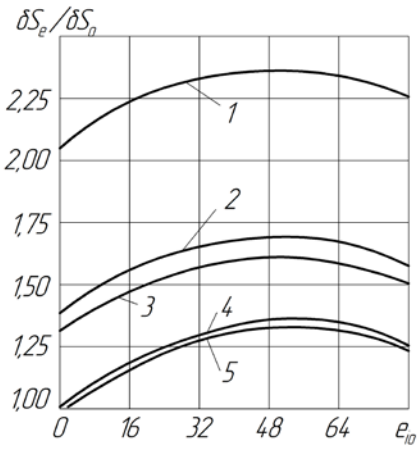


Рис. 8.29. Зависимость относительной разностенности детали из стали 11ЮА от степени предварительной деформации e_{i0} и степени деформации в верхней матрице $e_{i\text{в}}$, % (β=1°; α=15°, заготовка отожжена): *1* – 80; *2* – 60; *3* – 0; *4* – 40; *5* – 20

При оптимальных значениях $e_{i\text{в}}$ параметр разностенности стабилизируется, а в некоторых случаях и уменьшается. Это можно объяснить появлением в межматричном пространстве дополнительного усилия P_{z0}, которое действует как подпор при протягивании заготовки через нижнюю матрицу. Этот подпор может регулировать концентричность системы "матрица–пуансон–заготовка–матрица" и способствовать перераспределению металла в тангенциальном направлении. Увеличение степени деформации в верхней матрице по сравнению с его оптимальным значением уменьшает силу P_{z0}, и разностенность заготовки начинает возрастать. При малых деформациях на верхней матрице P_{z0} достигает предельного значения, что может привести к потери пластической устойчивости участка заготовки, находящегося в межматричном пространстве, и, как следствие, к ухудшению условий вытяжки в нижней матрице.

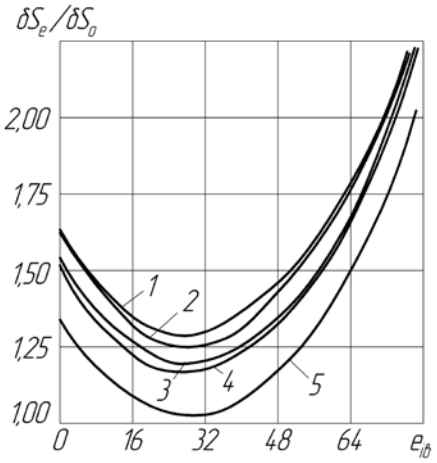


Рис. 8.30. Зависимость относительной разностенности детали из стали 11ЮА от степени деформации в верхней матрице $e_{iв}$ (β=1°; α=15°, заготовка отожжена) при различных степенях предварительной деформации e_{i0}, %: *1* – 60; *2* – 40; *3* – 80; *4* – 20; *5* – 0

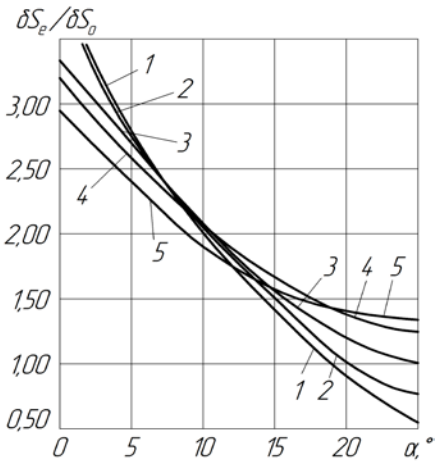


Рис. 8.31. Зависимость относительной разностенности детали из стали 11ЮА при вытяжке через одну матрицу от угла конусности матрицы α (β=1°, заготовка отожжена) при различных степенях предварительной деформации e_{i0}, %: *1* – 0; *2* – 20; *3* – 40; *4* – 60; *5* – 80

Увеличение угла конусности матрицы в пределах от 5 до 25 при всех условиях и для любого состояния материала сопровождается уменьшением относительной разностенности от ее максимальных значений (2,5...3,5) до минимальных (0,5...1,3) (см. рис. 8.31). Эту закономерность можно объяснить изменением механизма пластической деформации, в частности формированием сдвигового механизма деформации, приводящего к перераспределению металла в продольных сечениях заготовки с наибольшей $S^j_{\max}$ и наименьшей $S^j_{\min}$ толщинами.

Анализ результатов исследования позволил установить, что относительные значения овальности составляют сотые и десятые доли процента, что свидетельствует о высокой точности штампуемых деталей и самого процесса по этому параметру. На параметр $\delta d_1^j / \delta d_0^j$ влияют те же технологические факторы, что и на параметр разностенности.

С увеличением степени предварительной деформации e_{i0} в большинстве случаев параметр овальности $\delta d_1^j / \delta d_0^j$ возрастает для всех состояний материала заготовки. Исключение составляет вытяжка через одну или через две матрицы при $e_{iв} = 20\%$, при которой наблюдается некоторое уменьшение овальности с ростом e_{i0}. Параметр овальности находится в интервале 1,5...3,5, меньшие значения характерны для закаленного состояния заготовок.

Как правило, с увеличением степени деформации в верхней матрице значения параметра овальности возрастают.

Для закаленного состояния просматривается для функции $\delta d_1^j / \delta d_0^j = f(e_{i\text{в}})$ точка экстремума при $e_{i\text{в}} \approx 25...30\%$. Характерной особенностью для отожженного состояния является наличие единой точки пересечения всех кривых $\delta d_1^j / \delta d_0^j = f(e_{i\text{в}})$ при $e_{i\text{в}} = 52\%$, в которой значения параметра овальности не зависят от степени предварительной деформации e_{i0} и равны 2,55. С увеличением угла конусности матрицы параметр овальности для отожженного состояния изменяется однозначно – растет, для закаленного состояния – неоднозначно (при $\alpha = 10…15°$ его значения достигают максимума).

На основании выполненного анализа можно сделать следующий вывод: полученные математические модели показателей качества штампуемых деталей учитывают влияние основных технологических факторов (за исключением факторов настройки) и могут быть использованы для технологических расчетов и оптимизации процессов.

Обеспечение качества штампуемых деталей

При вытяжке различают точность размеров деталей (полуфабриката) по диаметру, высоте и толщине стенки.

На точность по диаметру влияют:

- точность изготовления рабочего инструмента и степень его износа;
- распружинивание (упругая разгрузка) вытянутой детали при выходе из штампа;
- зазор между пуансоном и матрицей;
- анизотропия свойств.

Вследствие анизотропии свойств деталь может приобрести овальную форму. На первых вытяжках распружинивание и овальность больше.

С учетом влияния перечисленных факторов достижимая точность вытяжки деталей по диаметру при вытяжке с утонением соответствует 8–11-му квалитетам (табл. 8.8).

Таблица 8.8

Точность изготовления колпачков по диаметру при свертке

Толщина заготовки, мм	Диаметр колпачка, мм				
	5 – 10	10 – 20	20 – 30	30 – 50	50
До 1	-0,80	-0,12	-0,20	-0,30	-0,30
1 – 2	-0,15	-0,20	-0,30	-0,40	-0,40
2 – 5	-0,20	-0,20	-0,30	-0,40	-0,40
5 – 10	-0,30	-0,35	-0,45	-0,50	-0,50

Чистота цилиндрической поверхности деталей, получаемых при вытяжке с утонением, соответствует 8-9-му классам (R_a = 0,63…0,32). Более высокий класс может быть получен применением калибровочных операций с небольшими степенями деформации.

При вытяжке с утонением точных деталей могут быть учтены упругие и тепловые деформации заготовки и инструмента.

На точность по высоте и толщине вытягиваемой детали влияют:

- точность по толщине поступающей на вытяжку заготовки;
- точность изготовления, степень и направление износа рабочего инструмента;
- геометрия рабочего инструмента;
- способ и режимы (степени деформации) при вытяжке;
- качество и состояние смазки;
- анизотропия свойств материала исходной заготовки;
- точность установки рабочего инструмента и заготовки.

Точность по толщине стенки заготовки, получаемой вытяжкой с утонением, достигает 5–4-го классов (11–12-й квалитеты).

При вытяжке с утонением значительное влияние на точность по высоте и толщине стенки детали оказывают отклонение от перпендикулярности оси пуансона к торцу матрицы и высота её цилиндрического пояска.

Для деталей диаметром 10…30 мм допуск на перпендикулярность не должен превышать 0,05 мм, а высота цилиндрического пояска матрицы должна находиться в пределах 0,5…1,5 мм.

Положительно влияет на повышение точности по высоте и толщине применение так называемого “плавающего” крепления нижней вытяжной матрицы, когда она самоцентрируется по полуфабрикату и пуансону. В табл. 8.9–8.10 даны рекомендации по допустимой разностенности, косине, виды и причины брака при свертке.

В производстве применяют лекальный и визуальный выборочный контроль. При лекальном контроле полуфабрикаты после вытяжки проверяют по диаметру скобой или кольцом, по кривизне – камерой, по разностенности – индикатором, по косине – калибром с допускаемыми пределами. В некоторых случаях после свертки полуфабрикаты подвергаются 100%-ному осмотру состояния поверхности с целью выявить дефекты металлургического происхождения и исключить засорение потока некачественными полуфабрикатами. Основные виды брака и их причины, возникающие при свертке и вытяжке, приведены в табл. 8.10, 8.11.

Таблица 8.9

Допустимая разностенность колпачков при свертке

Относительная толщина $S_{св}/d_1$	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
Разностенность, мм	0,04	0,05	0,05	0,06	0,08	0,10

Допустимая косина колпачков при свертке

Относительная высота, h_1/d_1	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
Косина, мм	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0

$S_{св}$ – толщина стенки в середине колпачка, мм; d_1– наружный диаметр колпачка, мм;
h_1 – высота колпачка.

Таблица 8.10

Виды и причины брака при свертке

Вид	Причина
1	2
Разностенность и косина	Несовпадение осей инструмента (пуансона и матрицы) вследствие износа направляющей втулки для пуансона. Несовпадение осей фиксирующей и рабочей частей матрицы. Неправильная форма рабочей части, косой поясок или нецентричность конуса у одной или обеих матриц. Неперпендикулярность плоскости матриц к оси пуансона вследствие неравномерной выработки опорной прокладки, перекоса корпуса, блока и т.д.
Разностенность и косина	Неравномерная толщина кружка, полосы. Неравномерные механические свойства кружка, полосы. Эллипсность матрицы или пуансона. Несовпадение оси матрицы относительно вырубного и сверточного пуансонов, неравномерный зазор между вырубным пуансоном и вырубной частью матрицы. Несовпадение осей матрицы и сверточного пуансона вследствие неконцентричности отверстия под сверточный пуансон в вырубном пуансоне.
Фестоны на торцевой поверхности колпачков	Анизотропия свойств исходной заготовки. Материал заготовки имеет различные механические свойства в направлении прокатки и под углом 45 и 90° к направлению прокатки
Спресованные бесформенные колпачки	Работа разрушенным пуансоном
Царапины, задиры на боковой поверхности	Неудовлетворительная термообработка рабочего инстумента (неоднородность закалки рабочей поверхности, образование при работе вмятин и налипание металла) Нарушение хромового покрытия, трещины на инструменте Загрязнение щелочной эмульсии, охлаждающей инструмент, или подача на свертку грязных кружков Неудовлетворительная полировка поверхности матрицы

Окончание табл. 8.10

1	2
Обрыв дна, стенки, надрыв в месте перехода от дна к стенке	Неудовлетворительное качество исходного металла заготовки (наличие дефектов металла: плен, раковин, расслоений и т.д.) Неудовлетворительные механические свойства: повышенная твердость (для стали и биметалла *HRB*>60) и малое относительное удлинение Неудовлетворительная структура: • крупное зерно (для латуни>0,12 мм, для биметалла и стали зерно феррита крупнее 5-го балла); • наличие цементитной сетки и структурно-свободного цементита в стали и биметалле; • наличие полосчатости (более 2 баллов в стали) Неправильная форма рабочей части пуансона или матрицы, малые радиусы закругления у пуансона или матрицы Сильный прижим вырубным пуансоном кружка в момент начала работы сверточного пуансона
Колпачки с венчиком на торце, трещинами по торцу и неправильной формой торцовой поверхности	Неотожженный или недостаточно отожженный кружок Подача кружка с заусенцами, полученного вследствие неправильного зазора между вырубным пуансоном и матрицей, или их затупление Попадание кружка выпуклостью в сторону пуансона Неправильный радиус на матрице
Колпачки с вырванным краем и односторонним фестоном	Неполная вырубка кружка, неудовлетворительная работа вырубного инструмента и неудовлетворительная работа направляющих устройств, отклонение в размерах полосы Выкрашивание края вырубного инструмента Затягивание перемычки, оставленной между вырубленными кружками
Колпачки с прорванным дном, надрывами в местах перехода от дна к стенке или сильно вытянутой донной частью, имеющей значительную сферу и кольцевое утонение в нижней части колпачка	Преждевременная работа сверточного пуансона (при длинном пуансоне) до окончания процесса вырубки
Колпачок с отрывающейся наружной кромкой	При наличии в вырубной части матрицы проточки для шлифовки образуется уступ, который врезается в кружок по окружности, оставляя отпечаток При свертывании кружка происходит скалывание металла и отделение в виде полного кольца или по части окружности Отделившиеся части остаются в матрице и оставляют отпечаток на поверхности колпачка
Низкий колпак с риской	Лопнувшая матрица
Неправильная форма торцовой поверхности колпачка	Неправильный выбор радиуса закругления матрицы свертки: при малом радиусе колпачок имеет внутренний скос; при большом радиусе – наружный скос
Отклонение по высоте колпачка	Неправильный зазор между сверточным пуансоном и матрицей (малый зазор) Неправильные радиусы на сверточном пуансоне и матрице

Таблица 8.11

Виды и причины брака при вытяжке

Вид	Причина
1	2
Разностенность, косина и искривления	Несовпадение осей пуансона и матриц Скольжение торца пуансона по дну колпака, из-за отсутствия направляющей части или большого диаметрального зазора между пуансоном и заготовкой Перекос опорной поверхности матрицы; косины цилиндрического пояска матрицы Неравномерность механических свойств материала заготовки вследствие неудовлетворительного отжига Неравномерность смазки по периметру Эллипсность матрицы и пуансона
Боковики и бесформенная вытяжка	Нарушение работы питателя, недосылка до упора, наклон или падение полуфабриката Отсутствие верхнего ограничителя Неправильное положение полуфабриката (донышком вверх)
Царапины по наружной поверхности	Налипание металла на рабочей части матриц вследствие плохой термообработки поверхности матрицы, плохого хромирования и больших давлений, развиваемых в процессе вытяжки Отсутствие на съемнике притуплений или перекос съемника Загрязненная или плохо проваренная эмульсия Грязный полуфабрикат
Царапины на внутренней поверхности	Нарушение хромового покрытия на пуансоне
Отрыв верхней части	Неправильная длина рабочего конуса пуансона, широкий цилиндрический поясок на матрице или малый угол конуса верхней матрицы Строгая матрица и полный пуансон Нескругленные переходы рабочих конусов у пуансона Перегрев или недостаточный отжиг полуфабриката, поступающего на вытяжку Неправильная форма колпака, наличие скоса или отпечатка по окружности колпака, полученного при свертке Неправильная длина полуфабриката вытяжки вследствие нарушения размеров в пуансонах на предыдущих операциях, нарушения радиусов
Косое дно	Строгая верхняя матрица и выработавшаяся нижняя матрица Поломка конца пуансона Эллипсообразный или косой поясок матрицы Несовпадение рабочего конуса и цилиндра в матрице Неперпендикулярность стола станка или основания питателя и оси пуансона Поступление на вытяжку косого или разностенного колпака
Забоины в донной части	Неправильная установка матрицы в колодке, при которой полуфабрикат при выходе ударяется о край отверстия колодки или плиты станка

Окончание табл. 8.11

1	2
Короткий или длинный полуфабрикат при большем или меньшем диаметре	Износ пуансона или матрицы по диаметру калибрующей части; пережог полуфабриката или крутой конус матрицы Строгая калибровочная часть матриц и полный по диаметру пуансон; плохо отожженный или разваленный конус матрицы Неправильно подобраны радиусы на пуансонах
Образование наплывов в зоне сопряжения стенки и дна	Поступление на вытяжку колпаков, изготовленных изношенным пуансоном Неправильный расчет инструмента на вытяжках, неправильный подбор радиусов на пуансонах
Продольные трещины на последней вытяжке	Недостаточный отжиг полуфабриката Большая конусность пуансона

8.8. Технологические расчеты при вытяжке

8.8.1. Исходные данные и последовательность расчетов

Исходные данные:

- чертеж детали или чертеж конечной заготовки;
- маршрутный технологический процесс изготовления детали;
- механические свойства (HV, $\sigma_в$) материала готовой детали или конечной заготовки;
- механические свойства поставляемого материала в термообработанном состоянии (HV_0, $\sigma_{в0}$);
- справочные данные по предельным и допустимым степеням деформации на вытяжке с утонением в виде табличных, графических или математических моделей.

Последовательность проектирования:

1. Подбор и анализ исходных данных.
2. Расчет размеров и механических свойств конечной штампованной заготовки (после последней вытяжки).
3. Оценка и обеспечение технологичности конструкции конечной штампованной заготовки.
4. Расчет размеров исходной заготовки.
5. Расчет количества операций.
6. Расчет размеров заготовок на промежуточных операциях.
7. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента.
8. Расчет технологических усилий.
9. Корректировка (при необходимости) технологического маршрута изготовления детали.

8.8.2. Расчет размеров и механических свойств конечной заготовки

Исходные данные:

- чертеж готовой детали (конечной заготовки);
- заданные ТУ механические свойства детали (конечной заготовки) в контрольных сечениях;
- принятый маршрутный технологический процесс изготовления детали и технологические схемы выполнения основных формоизменяющих операций;
- схемы формирования механических свойств готовой детали (конечной заготовки) в контрольных сечниях;
- рекомендуемые припуски на токарную обработку и обрезку;
- технологические требования, предъявляемые процессом вытяжки к конструкции деталей;
- теоретические или эмпирические зависимости (модели) характеристик механических свойств (*HV*, $\sigma_в$) от условий предварительной обработки (степени деформации, температуры и длительности отжига).

За конечную заготовку принимается заготовка после последней вытяжки.

Расчетные размеры (рис. 8.32):

- наружный диаметр d_n;
- толщина стенки S_n^j в расчетных сечениях (j – порядковый номер расчетного сечения);
- внутренние диаметры в расчетных сечениях d_n^j;
- радиусы сопряжения внутренних поверхностей R_n, r_n;
- максимальная толщина дна $S_n^д$;
- расстояние расчетных сечений от внутренней поверхности дна h_n^j;
- полная высота заготовки H_n;
- допускаемые отклонения на размеры.

Утолщение кромки краевой части детали без дульца оценивается коэффициентом

$$C_S^к = \sqrt{m_\Sigma^к}\ , \qquad (8.58)$$

где $m_\Sigma^к = d_{кр}/d_п$ – итоговый коэффициент обжима кромки.

Допуск на разностенность назначается по чертежу готовой детали и ТУ. Радиусы сопряжения внутренних поверхностей стенки и дна принимаются равными соответствующим радиусам готовой детали, т.е.

$$R_п = R; \quad r_п = r. \qquad (8.59)$$

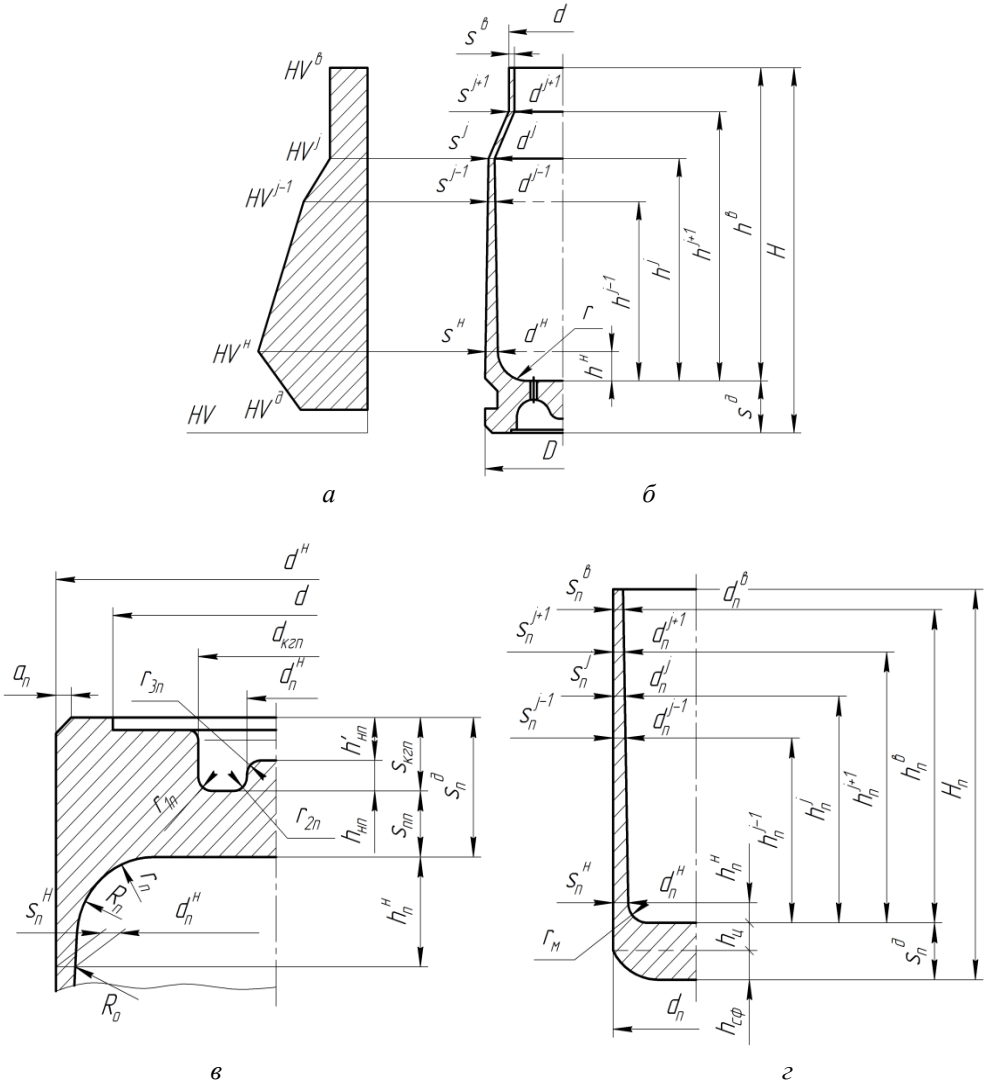


Рис. 8.32. Эпюра распределения твердости *HV* по длине гильзы (*а*); эскиз детали (*б*) и дна конечной после штамповки дна заготовки (*в*); эскиз конечной заготовки после вытяжки (*г*)

Форма дна заготовки устанавливается с учетом принятого типа маршрутного технологического процесса и технологических схем формоизменяющих операций (рис. 8.33).

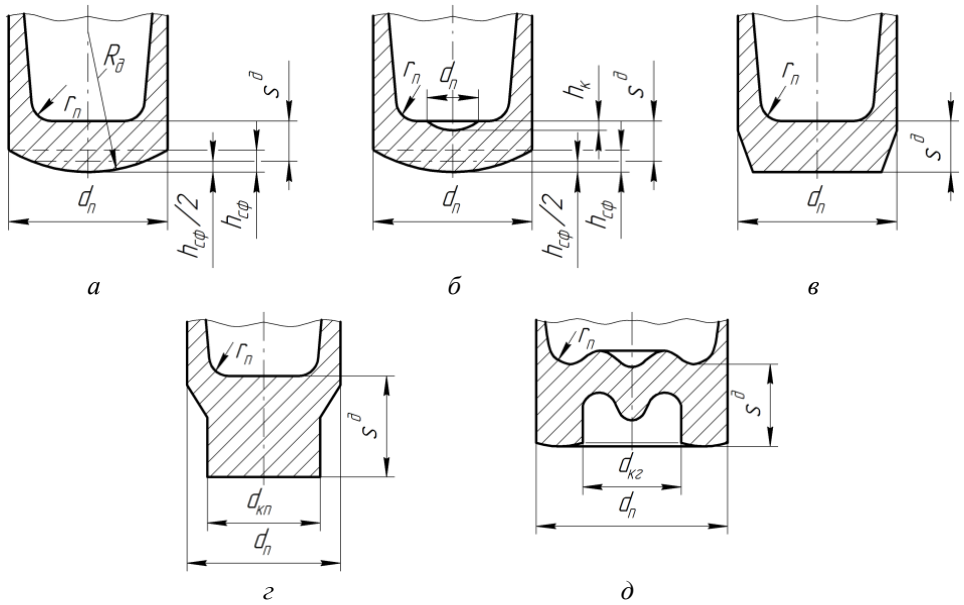


Рис. 8.33. Эскизы дна заготовок после вытяжки: *а*, *б* – со сферической наружной поверхностью; *в* – с плоским дном; *г* – для штамповки в разъемной матрице; *д* – с предварительно отштампованным дном

Размеры дна конечной заготовки определяются из условия равенства объемов заготовки и детали, ограниченных нижним расчетным сечением (рис. 8.34). Для заготовок со сферической наружной поверхностью (рис. 8.33,*а*,*б*) относительная высота сферической части $h_{сф}/S_д$ назначается в зависимости от относительной толщины дна заготовки $S_{дн}/d_п$ (табл. 8.12).

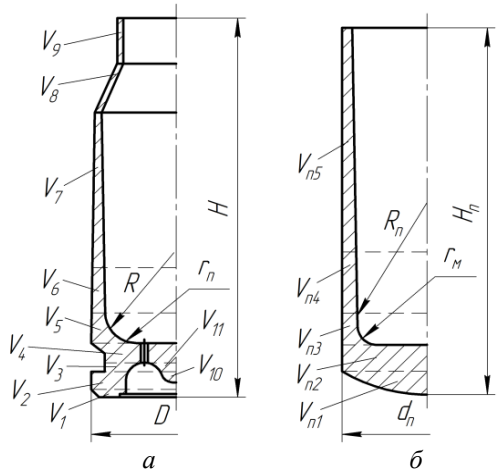


Рис. 8.34. Схема разбивки на элементарные объемы: *а* – детали; *б* – заготовки после последней вытяжки

Таблица 8.12

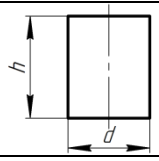
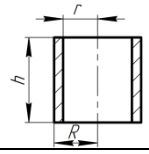
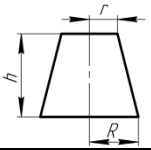
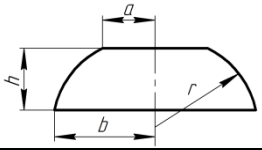
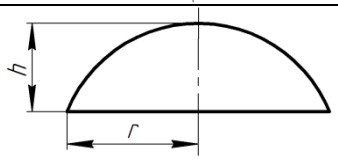
Относительная высота сферической части $h_{сф}/S_{дн}$ заготовок после последней вытяжки

Вид заготовки	$d_п$, мм	$S_д/d_п$	$h_{сф}/S_д$
Стальная заготовка детали клб. 7,62 мм	11,22	0,29	0,49
Стальная заготовка детали клб. 14,5 мм	26,66	0,38	0,36
Латунная заготовка детали клб. 12,7 мм	21,29	0,40	0,62

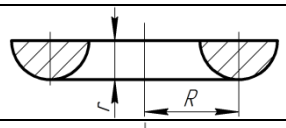
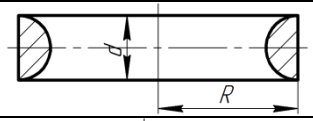
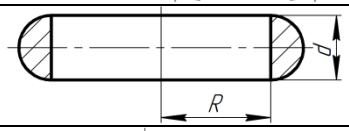
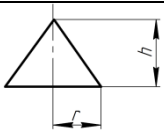
В табл. 8.13 приведены расчетные формулы для определения объемов элементарных фигур, на которые разбиваются чертеж детали и заготовки.

Таблица 8.13

Расчетные формулы для определения объема элементарных геометрических фигур

Эскиз фигуры	Формула
	$V = \frac{\pi d^2}{4} h$
	$V = \pi h(R^2 - r^2)$
	$V = \frac{\pi h}{3}(R^2 + r^2 + Rr)$
	$V = \frac{\pi h}{6}(3a^2 + 3b^2 + h^2)$
	$V = \frac{\pi h}{6}(h^2 + 3r^2)$

Окончание табл. 8.13

Эскиз фигуры	Формула
	$V = \pi^2 R r^2$
	$V = \frac{\pi^2 d^2}{4}(R - 0{,}2122d)$
	$V = \frac{\pi^2 d^2}{4}(R + 0{,}2122d)$
	$V = \frac{\pi \cdot h \cdot r^2}{3}$

Для заготовки со ступенчатым дном принимают $d_{\text{ê.ï}} = d_{\text{ê}} + 0{,}1 \div 0{,}2$ мм, $\alpha_{\text{п}} = \alpha$, где $d_{\text{к}}$ – диаметр экстракторной канавки гильзы.

Расстояния между расчетными сечениями (h_{j+1}–h_j) заготовки определяются из условия равенства объемов металла, заключенных между расчетными сечениями заготовки и детали (конечной заготовки после штамповки дна) с учетом припусков на возможную механическую обработку (рис. 8.34, 8.35), т.е.

$$(V_{j,j-1})_n = V_{j,j-1} + \Delta V_{j,j-1}, \tag{8.60}$$

где $(V_{j,j-1})_n$ – объем заготовки, заключенный между соседними расчетными сечениями j и j-1; $V_{j,j-1}$ – объем детали, заключенный между соседними расчетными сечениями j и j-1; $\Delta V_{j,j-1}$ – припуск на возможную механическую обработку, заключенный между соседними расчетными сечениями.

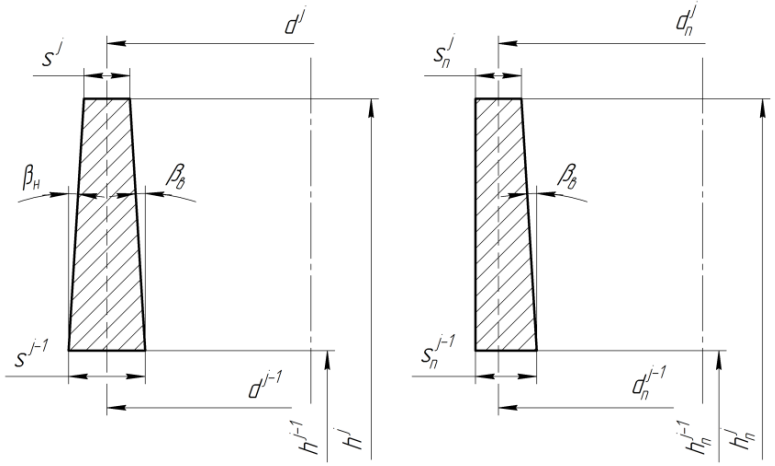
Для деталей типа гильз расстояния между расчетными сечениями (см. рис. 8.34, 8.35) могут быть определены по следующим приближенным формулам:

$$h_n^{\text{н}} = h^{\text{н}} \tag{8.61}$$

– для нижнего расчетного сечения,

$$h_n^j - h_n^{j-1} = (h^j - h^{j-1})C_h \tag{8.62}$$

– для любого промежуточного сечения (рис. 8.35), где $C_h = (1 + C_{Sj}) \big/ m_S^j (1 + C_{Sn})$; $m_S^j = S_n^j \big/ S_{n-1}^j$; $C_{Sj} = S^j \big/ S^{j-1}$; $C_{Sn} = S_n^j \big/ S_n^{j-1}$.



а *б*

Рис. 8.35. Схема определения расстояний между расчетными сечениями:
а – эскиз элемента детали (конечной заготовки после штамповки дна);
б – эскиз элемента заготовки после вытяжки

Более точный расчет может быть выполнен с применением теорем Гюльдена.

Полная высота заготовки будет равна:

$$H_n = S^{д} + h_n^{н} + \sum_{j=1}^{q}\left(h_n^j - h_n^{j-1}\right) + \Delta h_{об} + \Delta h_n, \qquad (8.63)$$

где q – количество расчетных сечений;

$$\Delta h_{об} \cong \frac{(d_в - S^{в})S^{в}}{(d_n - S_n^{в})S_n^{в}} \cdot \Delta h, \qquad (8.64)$$

Δh – припуск на обрезку дульца после обжима; Δh_n – припуск на обрезку после вытяжки (табл. 8.14).

При расчете высоты заготовки в чертежах на деталь и заготовку могут вводиться дополнительные расчетные сечения, например, в месте сопряжения конструктивных элементов детали (сечениями $j+1$, см. рис. 8.32).

Таблица 8.14

Припуск на обрезку, мм

Величина	Индекс детали				
	5,45	762В	762–43	127	145
Δh_i	14,0	6,0	6,0	–	17,0
Δh_n	12,0	10,0	12,0	30,0	20,0
Δh	1,0	1,0	1,5	3,0	5,0

Механические свойства заготовки определяются в зависимости от механических свойств детали, заданных в контрольных сечениях, и с учетом влияния последующих термообработки и деформационного упрочнения на штамповочных операциях другого вида, т.е. с учетом принятого технологического маршрута изготовления детали.

Если в технических условиях (ТУ) на изготовление изделия отсутствуют требования по механическим свойствам, то отпадает необходимость в определении механических свойств заготовки после последней вытяжки.

Алгоритм определения механических свойств конечной заготовки:

1. Оценить необходимость определения механических свойств: "да", если ТУ на готовую деталь заданы эти требования, "нет", если не заданы.

2. Определить координаты расчетных сечений заготовки, в которых должны формироваться требуемые механические свойства готовой детали (*HV*, $\sigma_в$) из условий (8.60)–(8.62) и характеристик $HV^j, \sigma_в^j$.

3. Выбрать технологическую схему формирования механических свойств готовой детали для каждого расчетного сечения заготовки из следующих вариантов:

3.1. с применением предварительного (до вытяжки) промежуточного (после одной, двух, трех вытяжек) и завершающего (после последней вытяжки) рекристаллизационного отжига (рис. 8.36-*1*);

3.2. то же, что и по варианту 3.1, но с последующей только деформационной обработкой за одну или несколько операций, выполняемых, например, способами обжима (рис. 8.36-*2*);

3.3. то же, что по варианту 3.1, но без промежуточного рекристаллизационного отжига (рис. 8.36-*3*);

3.4. то же, что по варианту 3.1, но без завершающего рекристаллизационного отжига (рис. 8.36-*4*);

3.5. с применением только предварительной разупрочняющей обработки и последующей деформационной обработки (рис. 8.36-*5*).

4. Выбрать модель формирования механических свойств готовой детали в зависимости от принятой на предыдущем этапе, технологической схемы формирования механических свойств (*HV*, $\sigma_в$) из следующего набора:

4.1. $$HV^j = \sum_{S=1}^{W} HV^j_{S_0,t}\left(e^j_{i_S}, t^j_S, \tau^j_S\right) - (W-1)HV_0^j \qquad (8.65)$$

– для схемы 3.1;

4.2. $$HV^j = \sum_{S=1}^{W} HV^j_{S_0,t}\left(e^j_{iS}, t^j_S, \tau^j_S\right) + \sum_{\eta=1}^{V} HV^j_{ei}\left(e^j_{ir}\right) - (W+V-1)HV_0^j \qquad (8.66)$$

– для схемы 3.2;

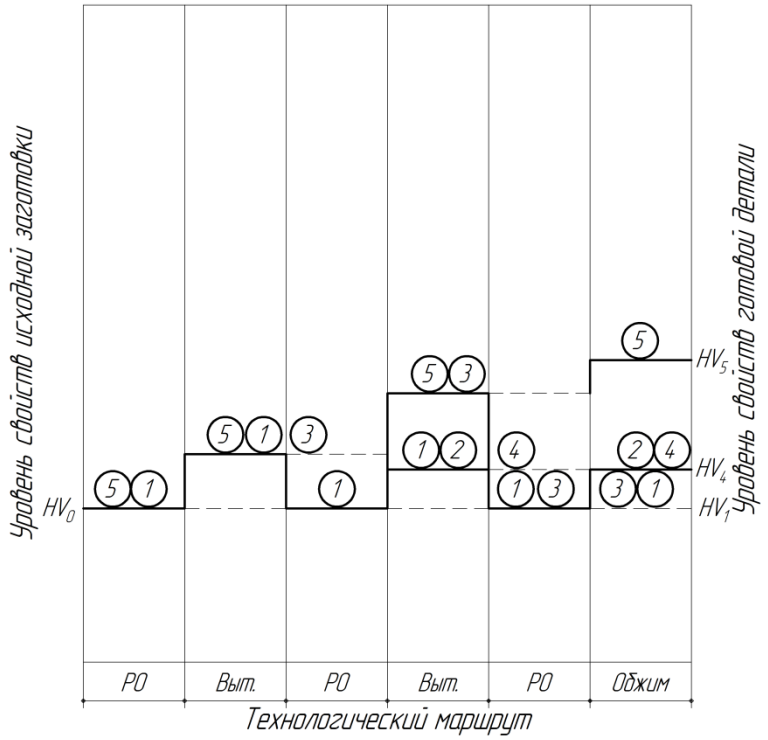


Рис. 8.36. Схемы формирования механических свойств (характеристик прочности) готовой детали, обрабатываемой по технологическому маршруту с применением вытяжки с утонением заготовки

4.3. $$HV^j = HV^j_{e_{i\Sigma},t}\left(e^j_{i\Sigma}, t^j, \tau^j\right) \qquad (8.67)$$

– для схемы 3.3;

4.4. $$HV^j = \sum_{S=1}^{W} HV^j_{S_0,t}\left(e^j_{iS}, t^j_S, \tau^j_S\right) + \sum_{\eta=1}^{V} HV^j_{ei}\left(e^j_{i\Sigma}\right) - (W+V-1)HV_0{}^j \qquad (8.68)$$

– для схемы 3.4;

4.5. $$HV^j = HV^j_{e_{i\Sigma}}\left(e^j_{i\Sigma}\right) \qquad (8.69)$$

– для схемы 3.5, где HV^j – твердость готовой детали в расчетном сечении j; $HV^j_{S_0t}(e^j_{i_S}, t^j_S, \tau^j_S)$ – многофакторная модель полного цикла обработки S, включающего одну вытяжку и следующий за ней рекристаллизационный отжиг; S – номер цикла (S=1, W); $HV_0{}^j$ – твердость материала в отожженном состоянии в сечении j; $HV^j_{S_0t}$ – выходная переменная (отклик) многофакторной

модели; $(e_{i_S}^j, t_S^j, \tau_S^j)$ – степень деформации, температура нагрева и время выдержки заготовки на цикле S в сечении j; $HV_{e_i}^j(e_{ir}^j)$ – однофакторная модель зависимости твердости металла в сечении j от степени деформации e_{ir}^j на неполном (без рекристаллизационного отжига) цикле обработки (r-цикле; r=1, V); $HV_{e_i}^j$ – выходная переменная (отклик) однофакторной модели; $e_{i\Sigma}^j = \sum_{i=1}^{n} e_{ii}$ – накопленная (суммарная) степень деформации за n вытяжек; t^j, τ^j – режим завершающего отжига; W – количество полных циклов (с рекристаллизационным отжигом); V – количество неполных циклов (без рекристаллизационных отжигов); $HV_{e_i\Sigma,t}^j(e_{i\Sigma}^j, t^j, \tau^j)$ – многофакторная модель, учитывающая влияние накопленной за несколько операций без промежуточных отжигов, степени деформации $e_{i\Sigma}^j$ и режима завершающего отжига (t^j, τ^j); $HV_{e_i\Sigma,t}^j$ – выходная переменная (отклик) многофакторной модели; $HV_{e_i\Sigma}^j(e_{i\Sigma}^j)$ – однофакторная модель, учитывающая влияние накопленной за несколько операций вытяжки без отжигов степени деформации $e_{i\Sigma}^j$. Однофакторные и многофакторные модели для основных материалов приведены в подразд. 2.3…2.5.

5. Выбрать режимы термообработки (полного рекристаллизационного отжига) по справочным или производственным данным.

6. Определить по справочным или производственным даннным характеристики механических свойств отожженного материала (HV_0, $\sigma_{в0}$).

7. Определить (выбрать) количество циклов, существенно влияющих на формирование механических свойств готовой детали (W, V).

8. В случае применения многоцикловой упрочняющей обработки по модели (8.65), при необходимости оценки влияния различных режимов термообработки после различных вытяжек, установить соотношение между степенями деформации на последней (n-й), предпоследней (n–1-й) и т.д. вытяжками (например, $e_{in-1}^j / e_{in}^j \cong 1{,}2$; $e_{in-1}^j / e_{in}^j \cong 1{,}3$ и т.п.), решить уравнение (8.65) относительно e_{in}^j и далее определить по выбранным пропорциям e_{in-1}^j, e_{in-2}^j и т.д.; если очевидно, что после последней вытяжки при проведении отжига (полного рекристаллизационного) полностью восстанавливаются структура и механические свойства, то может быть принято решение, что вытяжка не влияет на свойства готовой детали, т.е.

$$HV^j = HV_0 . \qquad (8.70)$$

9. В случае применения модели (8.66) число циклов V и степени деформации e_{ir}^{j} (r=1, V) на циклах назначаются по результатам расчета технологического процесса обжима, а степени деформации на вытяжках e_{iS}^{j} (S=1, W) определяются в соответствии с п. 8.

10. При применении модели (8.67) распределение степеней деформации по вытяжным операциям выполняется по методике, изложенной в п. 8.

11. При применении модели (8.68) накопленная степень деформации $e_{i\Sigma}^{j}$ и число неполных циклов V определить согласно п. 9, а e_{iS}^{j} (S=1, W) – согласно п. 8.

12. В случае использования модели (8.69) $e_{i\Sigma}$ определяется в зависимости от свойств готовой детали (HV^{j}, $\sigma_{\text{в}}^{j}$), а затем назначается распределение степеней деформаций по операциям и переходам при обеспечении условий

$$e_{i\Sigma}^{j} = \sum_{i=1}^{V} e_{ii}^{j}\ ; \quad e_{in}^{j} \le e_{in-1}^{j} \le e_{in-2}^{j}\,. \tag{8.71}$$

13. Рассчитать характеристики механических свойств конечной заготовки по моделям:

а) $HV_n^j = HV_{S=W,t}^{j}\left(e_{iw}^{j}\right)$, $\sigma_{\text{â}n}^{j} = \sigma_{\text{â}S=W,t}^{j}\left(e_{iW}^{j}\right)$ для схемы 3.1, 3.2; (8.72)

б) $HV_n^j = HV_{e_i\Sigma}^{j}\left(e_{i\Sigma}^{j}\right)$, $\sigma_{\text{â}n}^{j} = \sigma_{\text{â}n}^{j}\left(e_{i\Sigma}^{j}\right)$ для схемы 3.3; (8.73)

в) $HV_n^j = HV_{e_in}^{j}\left(e_{i\Sigma}^{j} - e_{i\text{îá}}^{j}\right)$, $\sigma_{\text{â}n}^{j} = \sigma_{\text{â}e_in}^{j}\left(e_{i\Sigma}^{j} - e_{i\text{îá}}^{j}\right)$ для схемы 3.4; (8.74)

г) $HV_n^j = HV^{j}$, $\sigma_{\text{â}n}^{j} = \sigma_{\text{â}}^{j}$ для схемы 3.5. (8.75)

После определения размеров и механических свойств конечной штампованной заготовки целесообразно оценить технологичность ее конструкции в соответствии с требованиями, изложенными в подразд. 8.6, и при необходимости откорректировать либо конструкцию, либо технологию.

8.8.3. Расчет размеров исходных заготовок

Исходные данные:

- размеры конечной заготовки после последней вытяжки с утонением;
- вид заготовки и ее заданный базовый размер;
- припуск на механическую обработку и обрезку заготовок после промежуточных вытяжек.

Методика расчета размеров конечной заготовки изложена в п. 8.8.2. Вид исходной заготовки определен принятой или разработанной маршрутной технологией.

По форме различают заготовки плоские из листового проката, пространственной формы сплошные, пространственной формы полые с дном. В соответствии с этим в структуре технологического процесса вытяжки с утонением могут быть предусмотрены этапы изготовления сплошных (плоских или объемных) и полых пространственной формы заготовок. Припуски на механическую обработку резанием регламентируются с учетом типа технологического процесса нормативными данными.

Основу алгоритма расчета составляет условие равенства объемов исходной и конечной заготовок. По форме в плане различают плоские заготовки круглые и призматические (квадратные, шестигранные).

К сплошным заготовкам пространственной формы, используемым для получения способами выдавливания полых заготовок для вытяжки с утонением, относятся, например, заготовки низкие ступенчатые (профилированные) (*а*); шаровидные (*б*); цилиндрические с наметкой (*в*), получаемые соответственно способами подштамповки (*а*), поперечно-винтовой прокатки (*б*) и поперечного выдавливания (*в*) (рис. 8.37). Полые заготовки пространственной формы могут быть цилиндрическими (*а*,*г*), коническими (*б*,*е*), ступенчатыми (*б*, *в*, *д*) (рис. 8.38). Базовый размер исходной заготовки назначается в зависимости от ее вида и размера конструктивного элемента конечной заготовки, принятого за базовый.

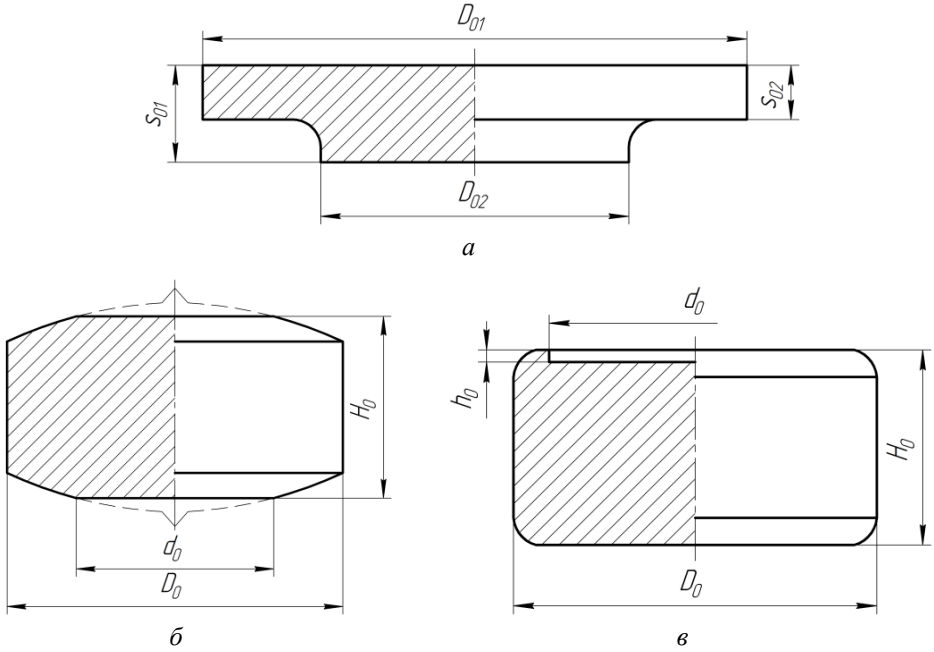


Рис. 8.37. Исходные сплошные заготовки пространственной формы

При применении плоских заготовок за базовый размер принимается, так же как и при вытяжке без утонения, ее толщина S_0. При этом S_0 назначается, как правило, в зависимости от толщины дна конечной заготовки $S_n^{д}$:

$$S_0 = C_{S0}^{д} S_n^{д}, \qquad (8.76)$$

где $C^{д}_{S0}$ – коэффициент, учитывающий изменение толщины дна на промежуточных операциях.

Рассчитанная по формуле (8.76) толщина исходной заготовки должна корректироваться с учетом действующего в отрасли сортамента листового проката.

В случае применения сплошной заготовки пространственной формы (в частности цилиндрической) за базовый размер целесообразно принять ее диаметр, который должен определяться в зависимости от наружного диаметра конечной штампованной заготовки в заданном *j*-м расчетном сечении и с учетом сортамента материала: $D_0 = C_{d0}^{j} d_n^{j}$, где C_{d0}^{j} – коэффициент, учитывающий изменение наружного диаметра заготовки в расчетном сечении *j* на промежуточных штамповочных операциях. Так, при изготовлении заготовки способами выдавливания значение коэффициента C_{d0}^{j} определяют величиной единичного (при однооперационном процессе) или суммарного (при многооперационном процессе) зазора на вхождение заготовки в приемную часть матрицы, т.е. $C_{d0}^{j} = 1 - \sum_{1}^{n} 2z_i^{j} / d_n^{j}$, где z^{j}_{i} – односторонний зазор между заготовкой и приемной частью матрицы; n – количество операций выдавливания.

Например, при обратном выдавливании рекомендуется принимать $2z \le 0{,}2$ мм, при наличии фасок на торцах заготовки $2z = (0{,}05\ldots0{,}1)$ мм. С учетом изложенного расчетными размерами исходных листовых заготовок будут диаметр и сторона многогранника, для сплошных заготовок пространственной формы – высота. Применение исходных сплошных заготовок более сложной формы требует выбора и других размеров (радиусов сопряжения, высот отдельных конструктивных элементов, углов конусности и др.), назначаемых с учетом технологических требований, предъявляемых процессом штамповки.

При применении исходной полой заготовки пространственной формы за базовые размеры целесообразно принимать наружный диаметр D^{j}_{0} и толщину стенки S_0^{j} в заданном сечении *j*, за расчетные – линейные размеры (рис. 8.38).

Так же как и при вытяжке без утонения, основу алгоритма расчета размеров составляют условия равенства объемов исходной и конечной заготовок (8.60)…(8.62).

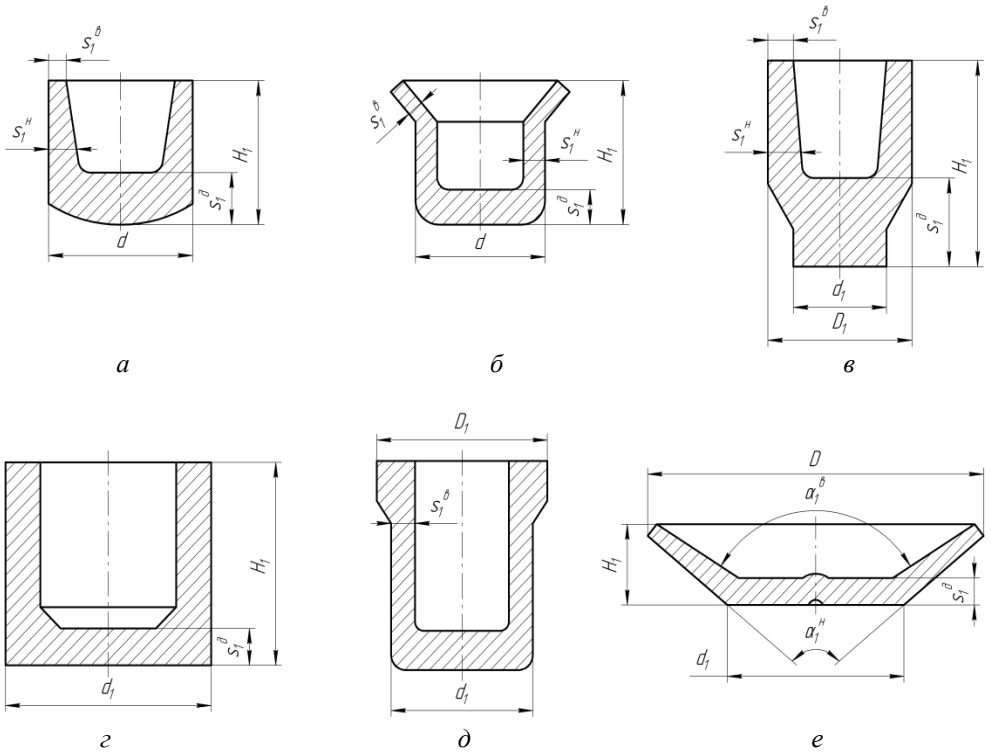


Рис. 8.38. Исходные полые заготовки для вытяжки с утонением

При определении объема конечной заготовки предусматривается:

- разбиение тела осесимметричной заготовки на простые геометрические фигуры;
- определение элементарных объемов по известным зависимостям или теоремам (см. табл. 8.13);
- вычисление полного объема конечной (или любой другой) заготовки суммированием элементарных объемов.

Анализ всего многообразия конфигураций осесимметричных заготовок (деталей), получаемых вытяжкой с утонением, показывает, что любой контур детали (рис. 8.39,*а*) можно разбить на два типа элементов: трапецию (как частный случай – прямоугольник) и криволинейную трапецию с выпуклым радиусом (частный случай – окружность и сектор – рис. 8.39,*б*). Элементарные объемы трехмерной детали образуются вращением этих элементов вокруг оси симметрии. Контур элемента может быть наружным, при этом элементарный объем суммируется, и внутренним, при этом объем вычитается.

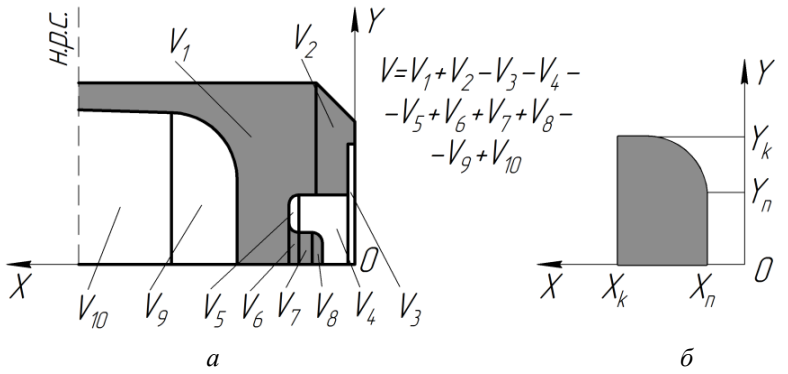


Рис. 8.39. Схема разбиения детали на элементы (*а*) и определения координат выделяемого элемента (*б*)

С контуром детали связывается система координат (*xOy*) (рис. 8.39,*б*), и, таким образом, задача разбиения контура на элементы сводится к расчету координат узловых точек: начальных ($x_н$, $y_н$) и конечных ($x_к$, $y_к$). При этом контур детали считается непрерывным (т.е. учитываются элементы, определяемые перпендикулярными к оси вращения отрезками, несмотря на равенство нулю их объемов). Предполагаем, что с каждым элементом связана только одна узловая точка, и, таким образом, каждый элемент будет характеризоваться координатами связанной с ним узловой точки, координатами узловой точки следующего элемента, радиусом (для нерадиусных элементов радиус равен нулю) и признаком контура (наружный или внутренний).

Кроме координат узловых точек, элемент характеризуется радиусом окружности R и следующими признаками: типом линии (отрезок прямой или дуга окружности) L, типом дуги окружности (вогнутая или выпуклая) K, типом контура (наружный или внутренний).

Весь контур детали описывается многомерным массивом (кортежем чисел):

$$\begin{matrix} L_1 & x_1 & y_1 & R_1 & A_1 \\ L_2 & x_2 & y_2 & R_2 & A_2 \\ L_i & x_i & y_i & R_i & A_i \\ L_N & x_N & y_N & R_N & A_N, \end{matrix}$$

где N – количество узловых точек в детали; x_i – абсцисса узловой точки; y_i – ордината узловой точки; R_i – радиус следующего за узловой точкой элемента; A_i – признак контура следующего за узловой точкой элемента (A_i=1 для наружного контура и A_i = 2 для внутреннего).

Для расчета объемов криволинейных элементов применена теорема Гюльдена, согласно которой объем тела вращения определяется произведением площади под кривой на длину окружности, описываемой центром тяжести вращающейся фигуры.

Исходя из этого объем фигуры, полученной вращением криволинейной трапеции (рис. 8.40, *а*), вычисляется по формуле

$$V = 2\pi r_{цт}(F_1 + F_2 + F_3), \qquad (8.77)$$

где $r_{цт} = (r_1F_1 + r_2F_2 + r_3F_3)/(F_1 + F_2 + F_3)$ – радиус, описываемый центром тяжести фигуры; $r_1 = R\left(4/3\dfrac{\sin 3\alpha}{2\alpha - \sin\alpha} - \cos\alpha\right)\cdot\cos\alpha + \dfrac{y_1 + y_2}{2}$ – радиус, описываемый вращением центра тяжести 1-го элемента фигуры; $r_2 = 1/3(y_2 - y_1) + y_1$ – радиус, описываемый вращением центра тяжести 2-го элемента; $r_2 = y_1/2$ – радиус, описываемый вращением центра тяжести 3-го элемента; $F_1 = R^2/2\cdot(r - \sin 2\alpha)$ – площадь 1-го элемента; $F_2 = 1/2\cdot\Delta x\cdot\Delta y$ – площадь 2-го элемента; $F_3 = \Delta x\cdot y_1$ – площадь 3-го элемента; $\Delta x = |x_2 - x_1|$; $\Delta y = |y_2 - y_1|$; $\Delta c = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$; $\sin\alpha = \Delta c/2R$.

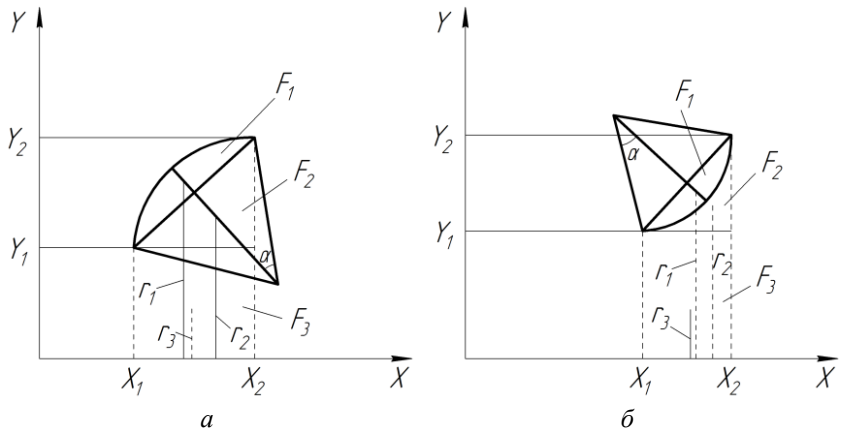


Рис. 8.40. Схема к расчету объемов фигур с выпуклым (*а*) и вогнутым (*б*) контурами

Для расчета объема фигуры, полученной вращением прямой (прямолинейной трапеции**),** используется формула

$$V = \pi/3\cdot(x_2 - x_1)\cdot(y_1^2 + y_2^2 + y_1y_2). \qquad (8.78)$$

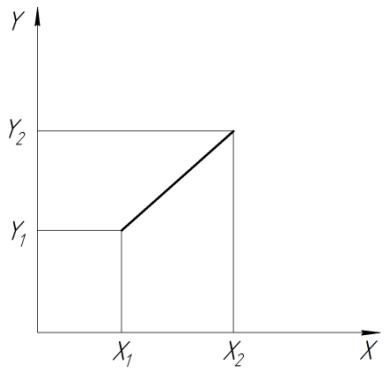


Рис. 8.41. Схема к расчету объема фигуры, полученной вращением отрезка прямой

Составляющие – согласно рис. 8.41.

Расчет объема конечной заготовки (и вообще любого тела вращения) производится по алгоритму, блок-схема которого представлена на рис. 8.42. Перед расчетом объема необходимо определить координаты узловых точек, количество и признаки элементов, т.е. образовать массив данных для расчета.

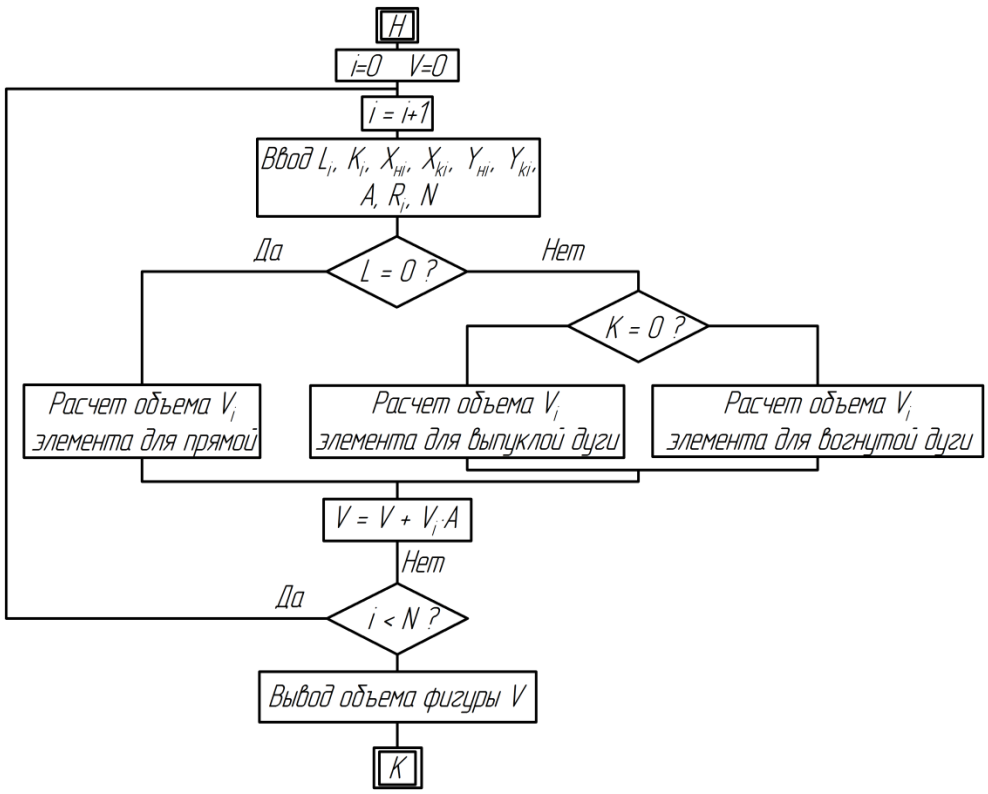


Рис. 8.42. Блок-схема алгоритма расчета объема заготовки (детали)

При расчете объемов отдельных фигур могут возникнуть трудности из-за отсутствия на чертеже полного набора необходимых размеров. В связи с этим необходимо предусмотреть расчет недостающих размеров по заданным чертежным размерам детали, а затем переход к определению объемов этих фигур. К таким размерам относятся, например, наружные диаметры d_n^j, d_n^{j+1} обжатых заготовок в промежуточных расчетных сечениях, текущие тангенсы угла наклона образующей внутренней поверхности $\mathrm{tg}\gamma^j$, расстояние Y_n^j точек на внутренней образующей детали, зависящее от координат X_n^j, отсчитываемых по оси детали, вычисляемые по формулам (рис. 8.43)

$$d_n^j = \frac{(h_n^{\text{ск}} - h_n^j)(d_n^{\text{н}} - d_n^{\text{ск}})}{h_n^{\text{ск}} - h_n^{\text{н}}} + d_n^{\text{ск}},$$

$$\mathrm{tg}\gamma^j = \frac{d_{n\text{вн}}^j - d_{n\text{вн}}^{j+1}}{2(h_n^j - h_n^{j+1})}, \qquad (8.79)$$

$$y^j = B_n^j + \sqrt{R_n^{j2} - (A_n^j - X^j)}, \qquad (8.80)$$

где $h_n^{\text{ск}}$, h_n^{j+1}, h_n^j, h_n^{j+1} – расстояния от базы отсчета (например, от наружной поверхности дна детали, служащей для обжима установочной технологической базой) до большого основания конуса ската, до нижнего расчетного сечения, до текущих, рядом расположенных, сечений соответственно; $d_{n\text{пн}}^j$, $d_{n\text{вн}}^{j+1}$ – внутренние диаметры заготовки в соседних сечениях; R_n^j – радиус кривизны (окружности) внутренней поверхности, описывающей ее профиль между рядом лежащими сечениями j и (j+1); A_n^j, B_n^j – смещение центра кривизны (окружности, описываемой радиусом R_n^j) по координатам X и Y (ось X совпадает с продольной осью детали, ось Y соответствует радиальному направлению).

При расчете объема конечной заготовки, полученной вытяжкой, за базу отсчета целесообразно принимать внутреннюю поверхность дна, которая служит установочной технологической базой. При этом $h_n^j > X > h_n^{j+1}$ и $d_{n\text{вн}}^j/2 > Y > d_{n\text{вн}}^{j+1}/2$. В частном случае $h_n^{j+1} = h_n^к$, где $h_n^к$ – высота расположения конечного рассчитываемого сечения.

В том случае, если сопряжение внутренних конической поверхности стенки и поверхности дна выполнено одним радиусом,

$$A_n^j = h_n^{\text{н}} + R_n^j \cdot \sin\gamma, \; B_n^j = d_{n\text{вн}}^j/2 - R_n^j \cdot \cos\gamma, \qquad (8.81)$$

где $d_{n\text{вн}}^j$ – внутренний диаметр в расчетном сечении j.

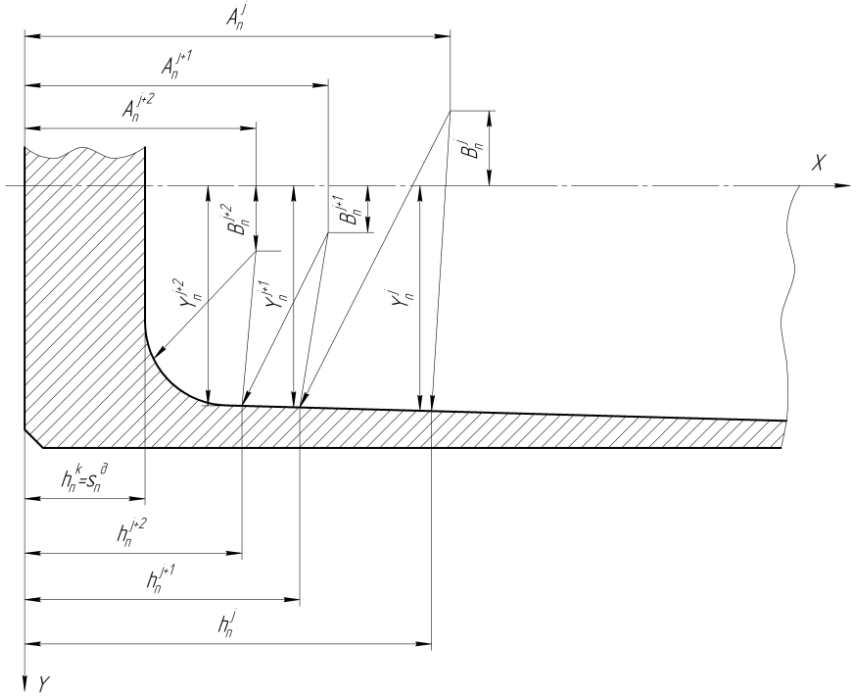


Рис. 8.43. Схема к расчету размеров промежуточных расчетных сечений

Если сопряжение внутренних поверхностей выполнено двумя радиусами R_n^j и R_n^{j+1} и заданы высоты расположения сечений h_n^j и h_n^{j+1}, $h_n^к$, то смещения центра кривизны A_n^j, B_n^j определяются по формулам (8.81), а смещения A_n^{j+1}, B_n^{j+1} можно приближенно определить из следующих соотношений:

$$A_n^{j+1} = h_n^{j+1} + R_n^{j+1}\left(h_n^j - h_n^{j+1}\right)/ R_n^j,$$

$$B_n^{j+1} = \left(R_n^j - R_n^{j+1}\right)\cos\arcsin\left[\left(h_n^j - h_n^{j+1}\right)/ R_n^j - \left(R_n^j - d_{n\text{вн}}^j\right)\right]. \qquad (8.82)$$

В случае если чертежом заданы три радиуса: R_n^j, R_n^{j+1} и R_n^{j+2} и высоты расположения сечений: h_n^j, h_n^{j+1}, h_n^{j+2} и $h_n^к$, то A_n^j, B_n^j определяются по формулам (8.81), A_n^{j+1}, B_n^{j+1} – по формулам (8.71), а смещения A_n^{j+2}, B_n^{j+2} – по соотношениям

$$A_n^{j+2} = h_n^{\text{н}} + R_n^{j+2},$$

$$B_n^{j+2} = B_n^{j+1} + \left(R_n^{j+1} - R_n^{j+2}\right)\sin\arccos\left[1 - \left(h_n^{j+2} - h_n^{j+1}\right)/ R_n^{j+2}\right]. \qquad (8.83)$$

Расчет размеров исходных плоских заготовок выполняется на основе использования условия равенств объемов и алгоритма, приведенного на рис. 8.42. При применении плоских листовых заготовок в виде кружков, квадратов и шестигранников их поперечные размеры рассчитываются по формулам

$$D_0 = \sqrt{4/\pi \cdot V_n / S_0 \eta_n}\ , \quad a_4 = \sqrt{V_n / S_0 \eta_n}\ , \quad a_6 = 0{,}62 \cdot \sqrt{V_n / S_0 \eta_n}\ ,$$

где a_4, a_6 – длины сторон квадратной и шестигранной заготовок.

Технологичность конструкции листовой заготовки, получаемой вырубкой, должна оцениваться по наиболее значимым критериям технологичности, например по относительной толщине S_0/D_0. В случае низкой технологичности принимается решение о корректировке базового размера или изменении способа получения заготовки.

Коэффициент использования металла η_n назначается с учетом технологического маршрута, в зависимости от количества штамповочных операций и, соответственно, количества операций обрезок, припусков на механическую обработку, а также потерь металла на угар и травление при проведении термической и химической обработки заготовок. Предполагается наличие у технолога соответствующей справочной информации.

Можно ориентировочно принимать η_n = 0,85...0,95 (меньшие значения назначают для больших толщин заготовок). Следует учитывать, что расчет поперечных размеров заготовок по приведенному алгоритму не является точным, так как на этом этапе неизвестно точное число штамповочных операций, а следовательно, и количество обрезок, которым главным образом и определяется числовое значение η_n. Поэтому более строгий подход к определению размеров заготовок должен предусматривать применение метода последовательных приближений. В первом приближении принимают значение η_n ,а затем после определения количества вытяжек и обрезок значения η_n и D_0 корректируются.

При определении размеров исходных полых заготовок в зависимости от размеров исходной плоской (D_0, S_0) и конечной штампованной (d_n, $S^{д}_n$, S^{j}_n, $S^{н}_n$, $h^{н}_n$, $h_n{}^{а}$, $h^{в}_n$, H_n) заготовки необходимо:

- определить базовые размеры;
- обеспечить технологичность конструкции с учетом применяемых способов ее изготовления и последующей обработки;
- выявить неизменяемые при последующей обработке элементы (участки) исходной заготовки и их размеры.

За базовый размер заготовки, изготавливаемой способом комбинированной вытяжки (свертки), принимаем толщину дна (рис. 8.44): $S^{д}_1 = C_S \cdot S^{д}_n$, где $C_S \geq 1$. Другие размеры, за исключением H_1, назначаются с учетом технологических требований, предъявляемых процессом изготовления заготовок:

а) из условия допустимого утонения стенки за одну операцию

$$S_1^{\text{в}} = S_0[m_{S1}^{\text{в}}];\ [m_{S1}^{\text{в}}] = K_m\left(m_{S1}\right)_{\text{пр}}, \tag{8.84}$$

где $[m_{S1}^{\text{в}}]$, $(m_{S1})_{\text{пр}}$ – допустимое и предельное значение коэффициента утонения стенки; $K_m \approx 1{,}1$ – коэффициент запаса;

б) из условия применения конического пуансона и формирования внутренней конической поверхности стенки (см. рис. 8.44);

$$d_1^{\text{н}} = d_1^{\text{в}} - 2(h_1^{\text{в}} - h_1^{\text{н}})\text{tg}\beta, \tag{8.85}$$

где β – угол конусности пуансона;

в) из условия сохранения постоянства формы дна и исключения разрушения внутренней поверхности придонного участка

$$r_1 \big/ S_1^{\text{д}} = 0{,}5 \ldots 0{,}8. \tag{8.86}$$

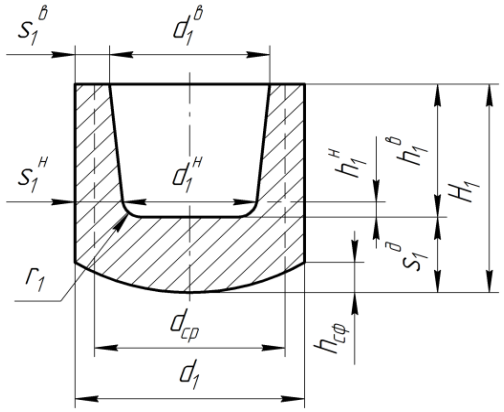


Рис. 8.44. Эскиз исходной полой заготовки, полученной на первой вытяжке с утонением (свертке) из полой заготовки

Расчет предельного коэффициента утонения стенки при вытяжке (свертке) через одну матрицу может выполняться по обобщенной многофакторной математической модели, полученной в работах С.С. Яковлева и др.:

$$\begin{aligned}(m_{S1})_{\text{пр}} = (&40{,}21 + 3{,}67x_1 - 7{,}33x_2 - 5{,}74x_3 - 3{,}5x_4 - 2{,}25x_5 + \\ &+ 0{,}34x_6 - 0{,}92x_1x_2 + 2{,}75x_1x_3 - 0{,}5x_1x_4 - 0{,}25x_1x_5 - \\ &- 0{,}084x_1x_6 + 0{,}5x_2x_3 + 1{,}5x_2x_5 + 0{,}42x_2x_6 - 0{,}33x_3x_4 + \\ &+ 0{,}42x_3x_5 - 0{,}42x_3x_6 + 0{,}17x_4x_5 + 0{,}83x_4x_6 - 0{,}42x_5x_6 - \\ &- 0{,}92x_1^2 + 1{,}08x_2^2 + 0{,}49\,x_2^2 - 0{,}59\,x_6^2)10^{-2},\end{aligned} \tag{8.87}$$

где $x_1 = (\alpha - 15)^{\circ}/5^{\circ}$; $x_2 = (m_{d1} - 0{,}65)/0{,}15$; $x_3 = f_{\text{п}}/f_{\text{м}} - 2$; $f_{\text{м}} = 0{,}05$; $x_4 = (n - 0{,}3)/0{,}2$; $x_5 = (R - 1)/0{,}5$; $x_6 = c/0{,}5$; α – односторонний угол конусности матрицы;

$f_п$ и $f_м$ – коэффициенты трения на контактных поверхностях пуансона и матрицы: n – показатель кривой упрочнения материала заготовки; R – средний коэффициент анизотропии для плоского напряженного состояния; c – характеристика анизотропии в условиях плоской деформации.

Формула (8.87) получена в предположении изменения учтенных факторов в следующих диапазонах:

$$\alpha = 10...30°; \quad m_{d1} = 0{,}5...0{,}8; \quad n = 0{,}1\ldots0{,}5;$$
$$R = 0{,}5\ldots1{,}5; \quad c = -0{,}5...0{,}5; \quad f_п = (1...3)\, f_м.$$

Оптимальное значение угла конусности матрицы может быть определено по формуле

$$\alpha^{\circ}_{опт} = 23{,}6 - 16{,}65 m_d + 7{,}45\, f_п / f_м - 6{,}75 n\,.$$

Для изотропного материала можно принять R = 1,0; c = 0. В других случаях необходимо для поставляемого материала определять характеристики анизотропии. При необходимости выполняется расчет степени деформации $e^{в}_{i1}$ по следующей формуле:

$$e^{в}_{i1} \cong 0{,}42 \ln \frac{1}{m_{d_1}} + \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{1}{m_{d_1} \cdot m^{в}_{S_4}}. \qquad (8.88)$$

Эта формула учитывает немонотонность: начальная стадия выполняется по схеме вытяжки без утонения, конечная – с утонением.

Рассчитываемые размеры исходной полой заготовки показаны на рис. 8.44, последовательность расчета и расчетные формулы – в табл. 8.15. Экспериментальные и производственные данные по допустимым деформациям приведены в табл. 8.15, 8.16.

Таблица 8.15

Расчет размеров заготовки после первой вытяжки

Определение величины	Расчетная формула	Примечание
1	2	3
Наружный диаметр заготовки, d_1	$d_1 = d^{в}_{ср1} + S^{в}_1$	
Средний диаметр заготовки в верхнем расчетном сечении, $d^{в}_{ср1}$	$d^{в}_{ср1} = D_0 \cdot m_{d1}$	
Коэффициент вытяжки, m_{d1}		Назначается по опытным данным
Толщина стенки в верхнем расчетном сечении, $S^{в}_1$	$S^{в}_1 = S_0 \cdot m^{в}_{S1}$	
Коэффициент утонения в верхнем расчетном сечении, $m^{в}_{S1}$	$m^{в}_{S1} \geq (m_{S1})_{пр}$	

Окончание табл. 8.15

1	2	3
Предельный коэффициент утонения, $(m_{S1})_{\text{пр}}$	(8.87)	Рассчитывается по формуле (8.87), либо назначается по опытным данным
Относительное изменение площади поперечного сечения заготовки в верхнем расчетном сечении, $\psi_1^{\text{в}}$	$\psi_1^{\text{в}} = 1 - m_{d1} \cdot m_{S1}^{\text{в}}$	
Внутренний диаметр заготовки в верхнем расчетном сечении, $d_1^{\text{в}}$	$d_1^{\text{в}} = d_{\text{ср1}}^{\text{в}} - S_1^{\text{в}}$	
Расстояние нижнего расчетного сечения от внутренней поверхности дна, $h_1^{\text{н}}$	$h_1^{\text{н}} = r_1(1 - \sin\beta_1)$	
Радиус сопряжения внутренних поверхностей, r_1		Назначается по технологическим рекомендациям
Угол конусности, β	β=0°30'…3°	
Расстояние верхнего расчетного сечения от внутренней поверхности дна, $h_1^{\text{в}}$	$h_1^{\text{в}} \approx h_1^{\text{н}} + \frac{\left(D_0^2 - d_1^2\right)S_0^2}{4d_{\text{ср1}}^{\text{в}} \cdot S_1^{\text{в}}}$	Из приближенного условия равенства перемещаемых объемов
Внутренний диаметр заготовки в нижнем расчетном сечении, $d_1^{\text{н}}$	$d_1^{\text{н}} = d_1^{\text{в}} - 2\left(h_1^{\text{в}} - h_1^{\text{н}}\right) \cdot \text{tg}\beta_1$	
Толщина стенки заготовки в нижнем расчетном сечении, $S_1^{\text{н}}$	$S_1^{\text{н}} = \frac{d_1 - d_1^{\text{н}}}{2}$	
Толщина дна заготовки, $S_1^{\text{д}}$	$S_1^{\text{д}} = (0{,}9\ldots1{,}0)S_0$	
Высота сферической части дна заготовки, $h_{1\text{сф}}$	$h_{1\text{сф}} \cong \frac{d_1 + r_1}{6}$	
Радиус вытяжной кромки матрицы, $r_{\text{м1}}$	$r_{\text{м1}}=(0{,}75\ldots3{,}50)S_0$	

Таблица 8.16

Предельные и допустимые значения показателей степени деформации на первой вытяжке из плоской заготовки

Количество матриц	Материал	Показатели степени деформации				Примечание
		m_d	m_s	ψ	e_i	
1	2	3	4	5	6	7
2	Латунь Л68 (D_0=46 мм, S_0=6,1 мм)	0,51	0,550	0,720	1,47	Разрушений нет
		0,52	0,500	0,740	1,56	
		0,52	0,450	0,764	1,68	
		0,53	0,400	0,788	1,79	
		0,54	0,350	0,811	1,93	20% разрушенных заготовок

Окончание табл. 8.16

1	2	3	4	5	6	7
2	Латунь Л68 (D_0=46 мм, S_0=6,1 мм)	0,55	0,300	0,836	2,08	100% разрушенных заготовок
	Латунь Л68 (D_0=46 мм, S_0=6,1 мм)	0,52	0,600	0,686	1,35	Разрушений нет
		0,52	0,550	0,714	1,45	
		0,53	0,500	0,736	1,54	
		0,53	0,450	0,762	1,66	
		0,54	0,400	0,784	1,77	
		0,54	0,350	0,811	1,93	20% разрушенных заготовок
		0,55	0,300	0,835	2,18	100% разрушенных заготовок
2	Биметалл 3 (S_0 =2,9 мм)	0,444	0,400	0,820	2,0	Разрушений нет
		0,434	0,455	0,800	1,88	
		0,420	0,470	0,800	1,88	100% разрушенных заготовок
2	Сталь 10	0,55	0,455	0,750	1,60	
1	Сталь 10 (D_0=32 мм, S_0=2,7 мм)	0,48	0,670	0,680	1,31	Разрушений нет
		0,50	0,670	0,670	1,26	
		0,53	0,500	0,730	1,54	
		0,55	0,330	0,815	1,87	100% разрушенных заготовок
1	Сталь 10	0,55	0,727	0,600	1,06	

П р и м е ч а н и е. Данные получены на основании лабораторных опытов

Т а б л и ц а 8.17

Степени деформации, применявшиеся в заводской практике на первой вытяжке (свертке) из плоской листовой заготовки

S_0, мм	S_0/D_0	Показатели степени деформации											
		m_d			$m_s^{в}$			$\psi^{в}$			$e_i^{в}$		
		$m_{dв}$	$m_{dн}$	$m_{d\Sigma}$	$m_{sв}^{в}$	$m_{sв}^{н}$	$m_{s\Sigma}^{в}$	$\psi_{в}^{в}$	$\psi_{н}^{в}$	$\psi_{\Sigma}^{в}$	$e_{iв}^{в}$	$e_{iв}^{н}$	$e_{i\Sigma}^{в}$
0,6	0,04	0,48	-	0,48	0,88	-	0,88	0,43	-	0,43	1,0	-	1,0
0,99	0,06	0,54	-	0,54	0,62	-	0,62	0,66	-	0,66	1,26	-	1,26
1,37	0,027	0,53	-	0,53	0,92	-	0,92	0,58	-	0,51	0,83	-	0,83
1,37	0,033	0,52	-	0,52	0,96	-	0,96	0,50	-	0,50	0,80	-	0,80
2,90	0,17	0,64	-	0,64	0,56	-	0,56	0,64	-	0,64	1,19	-	1,19
2,90	0,17	0,62	-	0,62	0,52	-	0,52	0,67	-	0,67	1,31	-	1,31
3,20	0,126	0,63	-	0,63	0,74	-	0,74	0,54	-	0,54	0,88	-	0,88
3,20	0,126	0,61	-	0,61	0,79	-	0,79	0,52	-	0,58	0,84	-	0,84
3,20	0,140	0,60	-	0,60	0,68	-	0,68	0,60	-	0,60	1,04	-	1,04
3,20	0,149	0,63	-	0,63	0,67	-	0,67	0,58	-	0,58	1,0	-	1,0
3,20	0,152	0,58	-	0,58	0,75	-	0,75	0,57	-	0,57	0,96	-	0,96
3,20	0,164	0,62	0,89	0,55	0,69	0,60	0,414	0,58	0,46	0,77	0,98	0,73	1,71
3,20	0,19	0,76	0,79	0,60	0,88	0,84	0,74	0,46	0,50	0,73	0,47	0,47	0,94
8,40	0,17	0,66	0,92	0,61	0,78	0,68	0,53	0,49	0,37	0,50	0,77	0,54	1,31
8,40	0,215	0,68	0,97	0,66	0,65	0,85	0,55	0,44	0,17	0,64	0,94	0,22	1,16

8.8.4. Расчет количества вытяжных операций

Алгоритм расчета основан на реализации условий формирования в конечной заготовке механических свойств (HV_n^j, $\sigma_{вn}^j$, $j=1,\ K$) и условий прочности деформируемой заготовки на каждой из операций.

Общий алгоритм включает в себя пять основных алгоритмов второго уровня (рис. 8.45): ввод исходных данных (01), расчет количества упрочняющих операций (03), расчет количества формоизменяющих операций (08), расчет количества неупрочняющих операций (010), расчет размеров заготовок на упрочняющих операциях (04). Состав исходных данных:

- размеры конечной заготовки (d_n, S_n^j, h_n^j, r_n, $S_n^д$, H_n, $j=1,\ K$ – п. 8.8.2);
- механические свойства конечной заготовки в расчетных сечениях ($\sigma_{вn}^j, HV_n^j$. $j=1,\ K$) (п. 8.8.2);
- механические свойства материала заготовки в отожженном состоянии ($\sigma_{в0}, HV_0$, ε_{iy}, ε_{ip});
- математические модели формирования механических свойств материала заготовки;
- принятый маршрутный технологический процесс изготовления детали;
- вид и размеры исходной полой заготовки (п. 8.8.3);
- математические модели предельной до разрушения степени деформации e_{ip}.

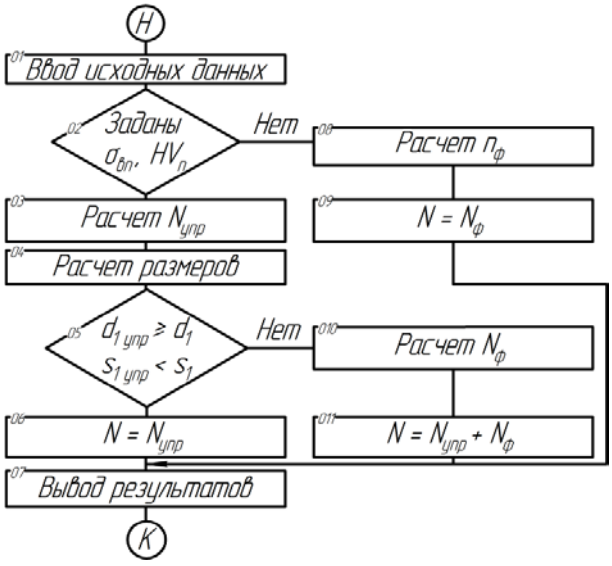


Рис. 8.45. Блок-схема общего алгоритма расчета количества операций

После определения исходных данных и в зависимости от требований по механическим свойствам (блок 02) оценивается необходимость расчета “упрочняющих” операций, формирующих механические свойства конечной заготовки (блок 03), их количества и размеров заготовок (блок 04), и сопоставление с размерами исходной полой заготовки (блок 05).

При выполнении указанного в блоке 05 условия расчетное количество упрочняющих операций обеспечивает полностью требуемое формоизменение от исходной полой до конечной заготовки, а общее количество операций вытяжки будет равно (блок 06):

$$n = n_{\text{упр}}. \tag{8.89}$$

При неравенстве размеров $d_{1\text{упр}} > d_1$ и $S_{1\text{упр}} < S_1$ размеры исходной полой заготовки приравнивают к соответствующим размерам заготовки на первой упрочняющей операции, т.е.

$$d_1 = (d_{1\text{ср}})_{\text{упр}},\ S_1^{\text{в}} = (S_1^{\text{в}})_{\text{упр}}\ . \tag{8.90}$$

При невыполнении условия (блок 05) общее количество вытяжных операций будет складываться как сумма “упрочняющих” $n_{\text{упр}}$ и “неупрочняющих” $n_{\text{ф}}$, т.е. чисто формоизменяющих операций (блок 011), т.е.

$$n = n_{\text{упр}} + n_{\text{ф}}\ . \tag{8.91}$$

Как правило, между “неупрочняющими” операциями вводится, а между “упрочняющими” операциями не вводится промежуточный полный рекристаллизационный отжиг. Расчет количества “неупрочняющих” $n_{\text{ф}}$ операций выделен в виде отдельного алгоритма (блок 010). При отсутствии требований по обеспечению механических свойств конечной заготовки количество “упрочняющих” операций не рассчитывается и, согласно блокам 08 и 09,

$$N = n_{\text{ф}}. \tag{8.92}$$

Расчет количества операций при изготовлении гильз и деталей аналогов выполняется по верхнему расчетному сечению, так как в нем после вытяжки достигаются наибольшие деформации и прочность.

Алгоритм расчета количества упрочняющих операций представлен на рис. 8.46.

В соответствии с алгоритмом на первом этапе расчета (блок 1), если заданы требования по механическим свойствам готовой детали, выбирается вид технологической схемы и модели формирования механических свойств (см. п. 8.8.2). При этом целесообразно принять допущение, что перед упрочняющими операциями материал заготовки находится в исходном отожженном состоянии (после полного рекристаллизационного отжига) и его механи-

ческие свойства в любом сечении будут равны механическим свойствам отожженного материала, т.е.

$$HV_{n-1}^{j} = HV_0 \text{ или } \sigma_{\text{в}\,n-1}^{j} = \sigma_{\text{в}0} \ . \qquad (8.93)$$

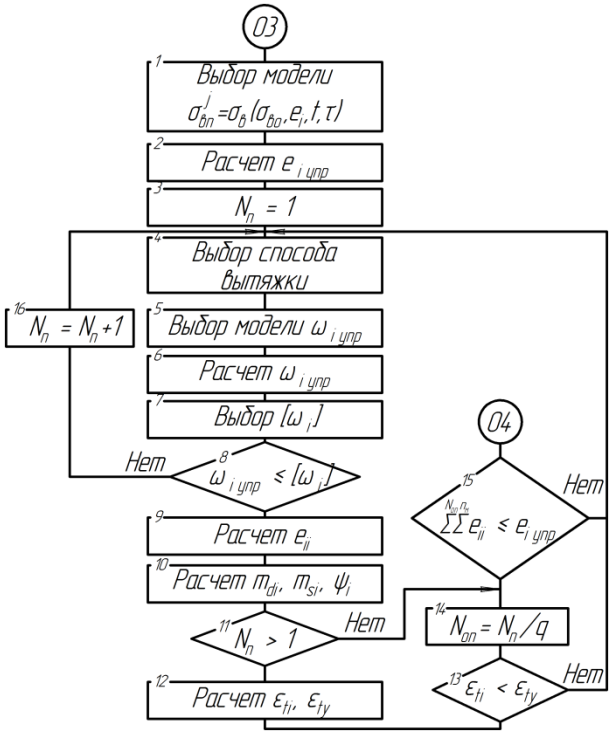


Рис. 8.46. Блок-схема алгоритма расчета количества упрочняющих операций

На втором этапе (блок 2) по принятой модели (8.65)…(8.69) в зависимости от характеристик механических свойств готовой детали ($HV^{j}, \sigma_{\text{в}}^{j}$) или конечной заготовки $\sigma_{\text{вп}}^{j}$ рассчитываются степени деформации e_{in}^{j} или $e_{in\Sigma}^{j}$ на последней вытяжке (если они рассчитаны ранее в п. 8.8.2, то вводятся в исходные данные (блок 01 – см. рис. 8.45)).

Далее оценивается возможность упрочнения материала заготовки до заданного уровня за один, два или большее число переходов (блоки 3, 10). За переход принимается вытяжка через одну матрицу.

При выборе способа вытяжки (блок 4) уточняется схема вытяжки в случае назначения технологом двух матриц в одном штампе (одновременная или последовательная), назначаются углы конусности матриц α и пуансона β, коэффициент вытяжки m_{d_n} по справочным данным.

При выборе модели коэффициента использования ресурса пластичности ω_i (блок 5) учитывают технологические схемы формирования механических свойств в расчетном сечении j в соответствии с технологическим маршрутом (п. 8.8.2) и принимают следующие допущения.

1. Каждый из переходов вытяжки в отдельности рассматривается как дискретно выполняемый акт приближенно монотонной пластической деформации, осуществляемый при $\nu_\sigma = \text{const}$ и $K = \text{const}$.

2. Процесс пластической деформации в целом при последовательной или одновременной вытяжке за несколько переходов (через несколько матриц) не является монотонным ($\nu_\sigma = \text{var}; K = \text{var}$).

3. Интенсивность пластического разрыхления (поврежденность) металла заготовки в начале каждого этапа деформирования равна нулю, а характер ее увеличения $\frac{d\omega_i}{de_i} = f(e_i)$ с ростом степени деформации не зависит от номера перехода.

4. Введение термообработки полностью или частично "залечивает" субмикро- и микродефекты в зонах интенсивной деформации и полностью или частично устраняет поврежденность металла заготовки.

5. Химическая обработка и смазка поверхности заготовки не влияют на ω_i.

Выбор модели $\omega_{i\text{упр}}$ осуществляется из следующего набора:

$$\omega^j_{i\text{упр}} = (e^j_{i\text{упр}} \big/ e^j_{i\text{р}})^a \tag{8.94}$$

– для однопереходного процесса;

$$\omega^j_{i\text{упр}} = \left[\left(\frac{e^j_{i1}}{e^j_{iy1}(K^j_1)} \right)^{\frac{a_1}{a_2}} + \frac{e^j_{i2}}{e^j_{i\text{р}2}(K^j_2)} \right]^{a_2} \tag{8.95}$$

– для двухпереходного процесса без промежуточной термообработки;

$$\omega^j_{i\text{упр}} = \left\{ \left[\left(\frac{e^j_{i1}}{e^j_{i\text{р}1}(K^j_1)} \right)^{\frac{a^j_1}{a_2}} + \frac{e^j_{i2}}{e^j_{i\text{р}2}(K^j_2)} \right]^{\frac{a_2}{a_3}} + \frac{e^j_{i3}}{e^j_{i\text{р}3}(K^j_3)} \right\}^{a_3} \tag{8.96}$$

– для трехпереходного процесса без промежуточных отжигов;

$$\omega_{i\text{упр}}^{j}=\left\langle\left\{\left[\left(\frac{e_{i1}^{j}}{e_{i\text{p}1}^{j}(K_1^{j})}\right)^{\frac{a_1}{a_2}}+\frac{e_{i2}^{j}}{e_{i\text{p}2}^{j}(K_2^{j})}\right]^{\frac{a_2}{a_3}}+\frac{e_{i3}^{j}}{e_{i\text{p}3}^{j}(K_3^{j})}\right\}^{\frac{a_3}{a_4}}+\ldots+\frac{e_{in}^{j}}{e_{i\text{p}n}^{j}(K_n^{j})}\right\rangle^{a_n^{j}} \qquad (8.97)$$

– для n-переходного процесса без промежуточных отжигов;

$$\omega_{i\text{упр}}^{j}=\sum_{j=1}^{N_{\text{ц}}}\left(\omega_{ii}^{j}-\Delta\omega_{it}^{j}\right) \qquad (8.98)$$

– для многопереходного процесса с промежуточными отжигами (многоцикловая обработка), где e_{i1}^{j}, e_{i2}^{j}, …, e_{in}^{j} – степени деформации на 1-м, 2-м, n-м переходах; $e_{i\text{p}1}^{j}$, $e_{i\text{p}2}^{j}$, …, $e_{i\text{p}n}^{j}$ – предельная до разрушения степень деформации на 1-м, 2-м, …, n-м переходах; K_1^{j}, K_2^{j}, …, K_n^{j} – показатель жесткости схемы напряженного состояния на 1-м, 2-м, n-м переходах; a_1, a_2, …, a_n – коэффициенты, учитывающие влияние свойств материала и схемы напряженного состояния K на интенсивность накопления поврежденности металла; $\Delta\omega_{it}^{j}$ – поправка, учитывающая уменьшение поврежденности металла в результате “залечивания” его дефектов при последующем отжиге.

Коэффициенты a_i^{j} (i=1, n) на любом i-м переходе определяются по формуле

$$a_i^{j}=a_0^{1+0{,}14K_i}, \qquad (8.99)$$

где a_0 – характеристика материала заготовки (для малоуглеродистой стали с содержанием углерода ~ 0,10% после полного отжига $a_0 \approx 2{,}4$, с содержанием углерода ~ 0,20% – $a_0 \approx 2{,}8$, для латуни Л68 – $a_0 \approx 2{,}0$).

Предельная до разрушения деформация для одно- ($e_{i\text{p}1}$) и двухпереходного ($e_{i\text{p}2}$) процессов вытяжки определяется по математическим моделям для сталей 11ЮА и 18ЮА (8.42)…(8.45), приведенным в подразд. 8.5.

Для процессов, выполняемых за три и более переходов без промежуточных отжигов, предельная до разрушения деформация приближенно может оцениваться по формуле

$$e_{i\text{p}}(n)=e_{i\text{p}1}^{a}e_{ii}^{1-a}, \qquad (8.100)$$

где $e_{i\text{p}1}$ – предельная до разрушения деформация для одноперехода (монотонного) процесса, определяемая по математической модели для случая

вытяжки через одну матрицу; e_{ii} – степень деформации на 2-м и любом i-м переходе. С уменьшением e_{ii} величина $e_{ip}(n)$ возрастает. Коэффициент K_i в (8.99) может быть определен по формулам

$$K_i = -1{,}39 \ln \frac{e_{i\text{p}}(e_{i0}, \alpha, \beta, e_{i\hat{a}}) - e_{i\hat{a}}}{2\varepsilon_{i\text{p}}} \qquad (8.101)$$

– при наличии математических моделей предельной до разрушения деформации $e_{i\text{p}}(e_{i0}, \alpha, \beta, e_{i\text{в}})$;

$$K_i = 1{,}73\left(2\ln\frac{1}{m_{Si}^j} + 5 - 6\sqrt{m_{di}^j}\right) \cong 1{,}73\left(2\ln\frac{1}{m_{Si}^j} - 1\right) \qquad (8.102)$$

– при отсутствии математических моделей $e_{i\text{p}}(e_{i0}, \alpha, \beta, e_{i\text{в}})$ типа (8.42)…(8.45).

Величина $e_{i\text{p}1}$ может быть определена также из соотношения

$$e_{i\text{p}1} = 2\varepsilon_{i\text{p}} \exp(-0{,}72K_1) \qquad (8.103)$$

– при отсутствии модели $e_{i\text{p}1} = e_{i\text{p}1}(e_{i0}, \alpha, \beta, e_{i\text{в}})$.

Поправка $\Delta\omega_{it}^j$ в формуле (8.98) определяется по модели А.А. Богатова восстановления ресурса пластичности для случая применения полного рекристаллизационного отжига из следующих условий:

$$\Delta\omega_{it}^j = \omega_i^j \quad \text{при} \quad \omega_i^j \le 0{,}25; \qquad (8.104)$$

$$\Delta\omega_{it}^j = 0{,}125 + 0{,}5\omega j_i \quad \text{при} \quad 0{,}25 < \omega_i^j \le 0{,}65; \qquad (8.105)$$

$$\Delta\omega_{it}^j = 1{,}3\left(1 - \omega_i^j\right) \quad \text{при} \quad 0{,}65 < \omega_i^j \le 1{,}0. \qquad (8.106)$$

В соответствии с выбранной моделью выполняется расчет ω_i (блок 6 рис. 8.46). Допустимое значение коэффициента использования ресурса пластичности $[\omega_i]$ устанавливается из уравнения баланса ресурса пластичности с учетом технологического наследования свойств обрабатываемого металла, включая изменение его свойств и при функционировании:

$$\omega_{i0} + \omega_{i\text{з}}^j + \omega_{i\text{форм}}^j + \omega_{i\text{упр}}^j + \omega_{i\text{э}}^j = 1, \qquad (8.107)$$

ω_{i0} – поврежденность металла исходного проката; $\omega_{i\text{з}}^j$ – поврежденность металла исходной полой заготовки; $\omega_{i\text{форм}}^j$ – поврежденность металла на вытяжных формоизменяющих операциях; $\omega_{i\text{упр}}^j$ – поврежденность металла на

упрочняющих операциях; $\omega_{i\text{э}}^{j}$ – эксплуатационная поврежденность металла изделия (при функционировании в результате дополнительной пластической деформации). Следовательно, при условии разрушения детали

$$\omega_{i\text{упр}}^{j} = 1 - \omega_{i0} - \omega_{i\text{з}}^{j} - \omega_{i\text{форм}}^{j} - \omega_{i\text{э}}^{j}. \qquad (8.108)$$

Для обеспечения условий нормального функционирования, исключающих разрушение гильзы,

$$\omega_{i\text{упр}}^{j} \le \left[\omega_{i}^{j}\right] = \frac{1 - \omega_{i0} - \omega_{i\text{з}}^{j} - \omega_{i\text{форм}}^{j} - \omega_{i\text{э}}^{j}}{K_{\omega_i}^{j}}, \qquad (8.109)$$

где $K_{\omega_i}^{j}$ – коэффициент запаса прочности, назначаемый в зависимости условий зксплуатации.

Выбор $[\omega_i^j]$ выполняется для трех категорий условий функционирования:

1) легкие (не устанавливаются требования по допустимым нагрузкам, остаточным напряжениям и физико-механическим свойствам),

$$0{,}65 < [\omega_i^j] \le 0{,}85; \qquad (8.110а)$$

2) средние,

$$0{,}25 < [\omega_i^j] \le 0{,}65; \qquad (8.110б)$$

3) тяжелые (предъявляются жесткие требования),

$$[\omega_i^j] \le 0{,}25. \qquad (8.110в)$$

В результате проверки условия прочности (блок 8) устанавливается возможность применения одного или нескольких (блок 16) переходов в результате последовательной корректировки числа переходов, геометрии инструмента, моделей $\omega_{i\text{упр}}$. При этом можно принимать переходы либо равно нагруженными по степени деформации

$$e_{ii}^{j} = e_{i\text{упр}}^{j} \big/ n_{\text{упр}}, \qquad (8.111)$$

либо по условию

$$e_{ii}^{j} < e_{ii-1}^{j}, \qquad (8.112)$$

при обеспечении равенства

$$e_{i\text{упр}}^{j} = \sum_{i=1}^{n_{\text{упр}}} e_{ii}^{j}, \qquad (8.113)$$

где $n_{\text{упр}}$ – количество упрочняющих переходов.

В блоке 9 определяются степени деформации по переходам e_{ii} в соответствии с равенствами (8.111)–(8.113). При этом для каждого расчетного сечения (j=1, K) определяется степень деформации $e^{j}_{i\text{упр}}$, необходимая для обеспечения расчетного уровня механических свойств $HV^{j}_{n}\left(\sigma_{вп}\right)$ в этом сечении с учетом схемы формирования на вытяжных операциях и математических моделей, как правило однофакторных: $HV^{j}_{n} = f\left(e^{j}_{i\text{упр}}\right)$.

В зависимости от числовых значений степени деформации e_{ii} рассчитываются коэффициенты утонения стенки m_{Si} и относительного сужения площади поперечного сечения ψ_i по формулам (8.115), (8.116) при заданных значениях коэффициентов вытяжки m_{di} в следующих пределах:

$$m_{dn} = 0{,}990\ldots0{,}995; \qquad m_{dn-1} = 0{,}980\ldots0{,}990;$$
$$m_{d(n-2)} = 0{,}970\ldots0{,}980; \quad m_{d(n-3)} = 0{,}950\ldots0{,}970, \qquad (8.114)$$

где n, $n-1$, $n-2$, $n-3$ – номера последней, предпоследней и т.д. вытяжек.

Расчетные формулы для определения коэффициентов утонения стенки заготовки m_{Si} и относительного сужения ψ_i:

$$m^{j}_{Si} = \frac{1}{m_{d_i}}\exp\left(-\frac{\sqrt{3}}{2}e^{j}_{ii\text{упр}}\right); \qquad (8.115)$$

$$\psi^{j}_{i\text{упр}} = 1 - m^{j}_{di\text{упр}}m^{j}_{Si\text{упр}}, \qquad (8.116)$$

где j=1,…, K – общее количество расчетных сечений.

При применении на операции двух или более переходов и, соответственно, такого же количества матриц в штампе может производиться проверка поперечной прочности заготовок в межматричном пространстве (оценка возможности образования продольных трещин) (блоки 11…13). Для этого выполняется расчет действительного и критического значений тангенциальной деформации заготовки в межматричном пространстве (блок 12) и проверка условия прочности (блок 13). Тангенциальная деформация в межматричном пространстве определяется по формуле

$$e_{ti} = \ln\left[1 + 2\frac{l_{\text{м}i}}{d_{i\text{в}}}\cdot\frac{\psi^{\text{ср}}_{i\text{н}}}{(1-\psi^{\text{ср}}_{i\text{н}})}\text{tg}\beta_i\right], \qquad (8.117)$$

где $l_{\text{м}i}$ – расстояние между матрицами (назначается с учетом конструкции штампа, инструментального блока); $d^{\text{в}}_{i\text{в}}$ – внутренний диаметр заготовки после вытяжки через верхнюю матрицу в верхнем расчетном сечении;β – угол

конусности пуансона; $d_{i\text{в}} = d^{\text{в}}_{i\text{вср}} + S^{\text{в}}_{i\text{в}}$ – наружный диаметр заготовки после протягивания через верхнюю матрицу; $d^{\text{в}}_{i\text{вср}}$ – средний по толщине стенки диаметр заготовки после протягивания через верхнюю матрицу;

$$d^{\text{в}}_{i\text{в}} = d^{\text{в}}_{i\text{вср}} + S^{\text{в}}_{i\text{в}};\ d^{\text{в}}_{i\text{вср}} = d^{\text{в}}_{i-1\text{ср}} m^{\text{в}}_{di};\ S^{\text{в}}_{i\text{в}} = S^{\text{в}}_{i-1} m^{\text{в}}_{Si};$$

$$\psi^{\text{ср}}_{i\text{н}} = \frac{\psi^{\text{в}}_{i\text{н}} + \psi^{\text{н}}_{i\text{н}}}{2};\ \psi^{\text{в}}_{i\text{н}} = 1 - m^{\text{в}}_{di} m^{\text{в}}_{Si};\ \psi^{\text{н}}_{i\text{н}} = 1 - m^{\text{н}}_{di} m^{\text{н}}_{Si}.$$

Расчет критического значения тангенциальной деформации в межматричном пространстве выполняется по формуле

$$[e_{it}] = \left[\frac{\sqrt{\delta_S}\,(\sqrt{\delta_S + 6n}) - \sqrt{\delta_S}}{2{,}4n} \right] n, \qquad (8.118)$$

где $\delta_S = S_{0\max} / S_{0\min} = 1 + \Delta S_{0\max} / \Delta S_{0\min}$ – относительная разнотолщинность в поперечном сечении; $\Delta S_{0\max}$ – абсолютная разнотолщинность – разнотолщинность в сечении (может приниматься равной допуску на толщину стенки); $n = e_{i\text{у}}$ – коэффициент, характеризующий способность материала к упрочнению.

Проверка условия поперечной прочности производится по неравенству

$$e_{it} < [e_{it}]. \qquad (8.119)$$

Если условие не удовлетворяется, то находят приемлемые значения параметров $l_{\text{м}i}$, β_i, $\psi^{\text{ср}}_{i\text{н}}$ и соответственно корректируют способ вытяжки (блок 4). Количество операций устанавливается (блок 14) в зависимости от принимаемого на каждой операции числа переходов (количества матриц в штампе). Расчет количества операций завершается проверкой условия

$$\sum_{i=1}^{n_{0n}} \sum_{i=1}^{n_n} e^j_{ii} = e^j_{i\text{упр}}. \qquad (8.120)$$

8.8.5. Расчет размеров заготовок после упрочняющих операций

В соответствии с общим алгоритмом (см. рис. 8.45) после расчета количества упрочняющих операций определяются размеры заготовок после вытяжек на этих операциях (блок 04). Так как размеры заготовки после последней вытяжки (конечной заготовки) определены (см. п. 8.8.2), то этот расчет может выполняться для предпоследней (n–1-й), предпредпоследней (n–2-й) и т.д.

вытяжек. Ниже приводится методика расчета для предпоследней *n*–1-й вытяжки. Для предпредпоследней *n*–2-й, *n*–3-й и т.д. расчет выполняется аналогично.

Исходные данные:

- размеры конечной заготовки: d_n, $d_n^{\text{н}}$, …, d_n^j, …, $d_n^{\text{в}}$, $S_n^{\text{н}}$, …, S_n^j, …, $S_n^{\text{в}}$, h_n, …, h_n^j, …, $h_n^{\text{в}}$, $S_n^{\text{д}}$, r_n, R_n, H_n (см. п. 8.8.2);
- показатели степени деформации в расчетных сечениях заготовок по операциям: e_{in}^j, ψ_n^j, m_{Sn}^j, m_{dn}^j, e_{in-1}^j, ψ_{n-1}^j, m_{Sn-1}^j, m_{dn-1}^j, e_{in-2}^j, ψ_{n-2}^j, m_{Sn-2}^j, m_{dn-2}^j и т.д. (j=1,…, K).

Расчетные размеры (рис. 8.47, 8.48):

- наружный диаметр d_{n-1};
- внутренний диаметр в расчетных сечениях: $d_{n-1}^{\text{н}}$, d_{n-1}^j, $d_{n-1}^{\text{в}}$;
- толщина стенок в расчетных сечениях: $S_{n-1}^{\text{н}}$, S_{n-1}^j, $S_{n-1}^{\text{в}}$;
- расстояние расчетных сечений от внутренней поверхности дна: $h_{n-1}^{\text{н}}$, h_{n-1}^j, $h_{n-1}^{\text{в}}$;
- толщина дна $S_{n-1}^{\text{д}}$;
- полная высота H_{n-1};
- радиус сопряжения стенки и дна r_{n-1}.

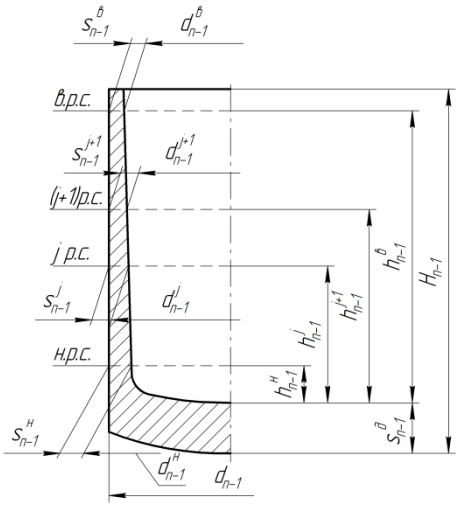


Рис. 8.47. Эскиз заготовки после предпоследней вытяжки

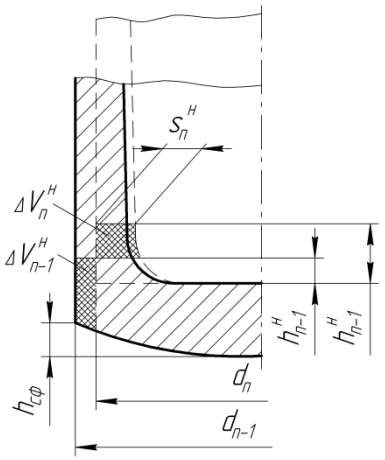


Рис. 8.48. Схема к определению положения нижнего расчетного сечения

Принимая во внимание, что внутренняя поверхность заготовки коническая, расчет выполняем для трех ее сечений: нижнего («н»), промежуточного («п») и верхнего («в»).

Расчет требуемых степеней деформации выполняется по моделям формирования механических свойств. Для верхнего сечения этот расчет выполнен в п. 8.8.2, для двух соседних сечений «н» и «п» требуемые суммарные степени деформации на упрочняющих операциях определяются по однофакторной модели, например для стали 18ЮА:

$$HV_{\text{выт}}[(e_{ii})_{\text{выт}}] = 126 + 173{,}3\cdot (e_{ii})_{\text{выт}} - 63{,}4\cdot [(e_{ii})^{2}_{\text{выт}}].$$

Для этой цели можно воспользоваться и известными графическими зависимостями механических свойств материала от степени деформации, например относительного сужения Ψ (рис. 8.49–8.52).

Принимаются заданные ТУ минимальные значения твердости: в сечении «п» и в сечении «н» – как среднее арифметическое значений твердости в сечении «п» и в дне, т.е.

$$HV^{\text{н}}_{\text{выт}} = \frac{HV^{\text{д}}_{\text{выт}} + HV^{\text{п}}_{\text{выт}}}{2}.$$

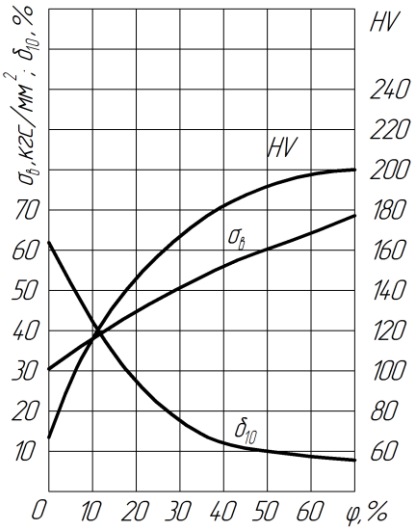


Рис. 8.49. Зависимость механических свойств латуни Л68 от степени наклепа

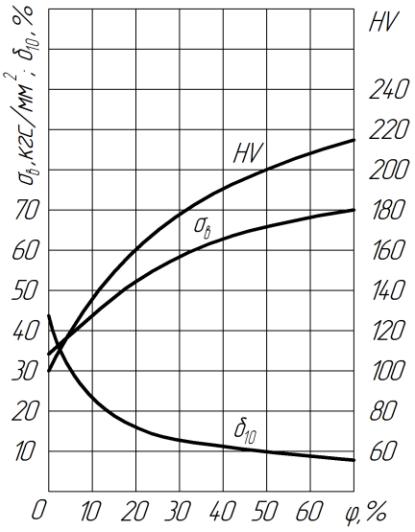


Рис. 8.50. Зависимость механических свойств стали 11КП от степени наклепа

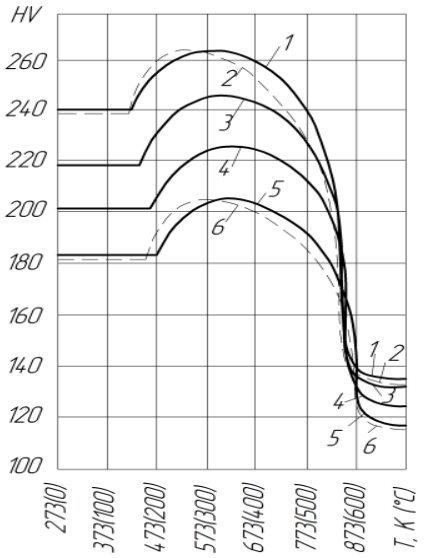


Рис. 8.51. Зависимость твердости стали 11ЮА от температуры отжига при различных степенях предварительной деформации, ψ,%: *1*, *2* – 60; *3* – 40; *4*, *5* – 20 (длительность отжига для кривых *1*, *3*, *4*, *5* – 20 мин; *2*, *6* – 60 мин)

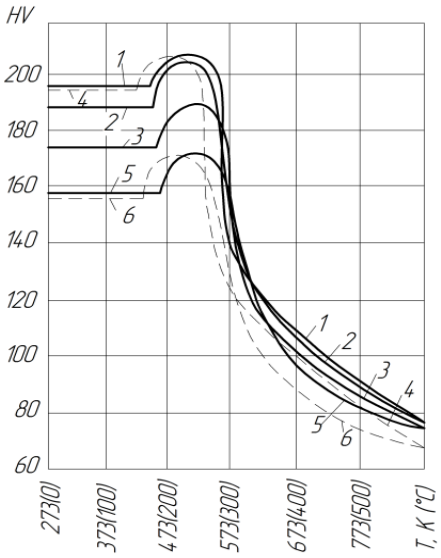


Рис. 8.52. Зависимость твердости латуни Л68 от температуры отжига при различных степенях предварительной деформации, ψ,%: *1* – 60; *2* – 50; *3* – 35; *4* – 60; *5*, *6* – 25 (длительность отжига для кривой *1*, *2*, *3*, *5* – 20 мин и для *4* и *6* – 60 мин)

Далее следует выполнить распределение степеней деформации в сечениях «п» и «н» для каждой из упрочняющих операций и переходов с учетом рекомендаций (8.114) по коэффициентам вытяжки m_{di}, расчетных формул (8.115), (8.116), (8.120), по определению коэффициентов $m_{S_i}^j$ и ψ_i^j и известного правила уменьшения степени деформации от первой к последней операции.

Для обеспечения механических свойств детали в заданных контрольных сечениях методика расчета предусматривает определение действительного положения каждого из расчетных сечений в заготовках после последней и предпоследней вытяжек. Действительное положение расчетных сечений устанавливается из условия равенства перемещаемых объемов.

Последовательность расчета и расчетные формулы для определения размеров заготовки предпоследней вытяжки приведены в табл. 8.18 (рис. 8.53, 8.54).

Таблица 8.18

Расчет размеров заготовки после предпоследней вытяжки

Определяемая величина	Расчетная формула
1	2
Расстояние нижнего расчетного сечения от внутренней поверхности дна, $h^{н}_{n-1}$	$h^{н}_{n-1}=\frac{h^{н}_{n}\cdot S^{н}_{n}(d_n-S^{н}_{n})-0{,}001S^{д}_{n}\cdot d^{2}_{n}}{S^{н}_{n-1}(d_{n-1}-S^{н}_{n-1})+0{,}02d^{2}_{n-1}}$
Толщина стенки в нижнем расчетном сечении, $S^{н}_{n-1}$	$S^{н}_{n-1}=\frac{S^{н}_{n}}{m^{н}_{Sn}}$
Наружный диаметр заготовки, d_{n-1}	$d_{n-1}=d^{в}_{(n-1)ср}+S^{в}_{n-1};$ где $d^{в}_{(n-1)ср}=\frac{d^{в}_{nср}}{m^{в}_{dn}};d^{в}_{nср}=d_n-S^{в}_{n}$
Расстояние расчетного сечения «п» от внутренней поверхности дна, $h^{п}_{n-1}$	$h^{п}_{n-1}=\frac{h^{п}_{n}\cdot S^{п}_{n}(d_n-S^{п}_{n})-0{,}001S^{д}_{n}\cdot d^{2}_{n}}{S^{п}_{n-1}(d_{n-1}-S^{п}_{n-1})+0{,}02d^{2}_{n-1}}$
Толщина стенки в расчетном сечении «п», $S^{п}_{n-1}$	$S^{п}_{n-1}=\frac{S^{п}_{n}}{m^{п}_{Sn}}$
Толщина стенки в верхнем расчетном сечении, $S^{в}_{n-1}$	$S^{в}_{n-1}=\frac{S^{в}_{n}}{m^{в}_{Sn}}$
Внутренний диаметр заготовки в нижнем расчетном сечении, $d^{н}_{n-1}$	$d^{н}_{n-1}=d_{n-1}-2S^{н}_{n-1},$
Внутренний диаметр заготовки в расчетном сечении «п», $d^{п}_{n-1}$	$d^{п}_{n-1}=d_{n-1}-2S^{п}_{n-1}$
Внутренний диаметр заготовки в верхнем расчетном сечении, $d^{в}_{n-1}$	$d^{в}_{n-1}=d_{n-1}-2S^{в}_{n-1}$
Радиус сопряжения внутренних поверхностей стенки и дна, r_{n-1}	$r_{n-1}=r_n+z_n\sqrt{2\frac{r_n}{h^{н}_{n-1}}-1}$
Односторонний зазор на свободное вхождение пуансона в n–1-ю заготовку на n-й вытяжке, z_n	$z_n=0{,}05...0{,}10$, мм
Расстояние верхнего расчетного сечения от внутренней поверхности дна заготовки, $h^{в}_{n-1}$	$h^{в}_{n-1}=h^{п}_{n-1}+(h^{в}_{n}-h^{п}_{n})C^{в}_{h(n-1)}$
Коэффициент изменения высоты между расчетными сечениями «в» и «п», $C^{в}_{h(n-1)}$	$C^{в}_{h(n-1)}=m^{п}_{Sn}\frac{1+C^{в}_{Sn}}{1+C^{в}_{S(n-1)}}$
Коэффициент утонения стенки заготовки в сечении «П», $m^{п}_{Sn}$	$m^{п}_{Sn}=\frac{S^{п}_{n}}{S^{п}_{n-1}}$

Окончание табл. 8.18

1	2
Коэффициент уменьшения толщины стенки заготовки от верхнего сечения к сечению «п» на *n*-й вытяжке, $C^{в}_{Sn}$	$C^{в}_{Sn} = \dfrac{S^{в}_{n}}{S^{п}_{n}}$
Коэффициент уменьшения толщины стенки заготовки от верхнего сечения к сечению «н» на (*n*–1)-й вытяжке, $C^{в}_{S(n-1)}$	$C^{в}_{S(n-1)} = \dfrac{S^{в}_{n-1}}{S^{п}_{n-1}}$
Толщина дна заготовки, $S^{д}_{n-1}$	$S^{д}_{n-1} = S^{д}_{n}$
Полная высота заготовки, H_{n-1}	$H_{n-1} = S^{д}_{n-1} + h^{в}_{n-1} + \left(H_n - h^{в}_{n} - S^{д}_{n-1}\right)\cdot m^{в}_{dn}\cdot m^{в}_{Sn}$

При вытяжке заготовок на завершающих операциях без промежуточных отжигов и необходимости обеспечивать заданные механические свойства детали по аналогичной схеме (см. табл. 8.18) можно рассчитать размеры заготовки после *n*–2-й вытяжки в зависимости от результатов на *n*–1-й.

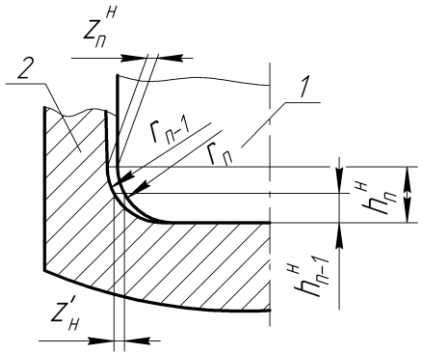
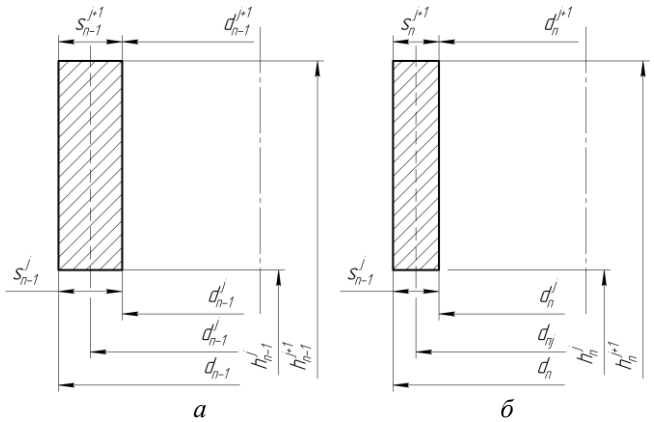


Рис. 8.53. Схема к определению радиального зазора на предпоследней вытяжке



а *б*

Рис. 8.54. Схема к определению расстояний между расчетными сечениями:
а, *б* – конструктивные элементы заготовки после (*n*–1)-й и *n*-й вытяжек

Алгоритм расчета количества неупрочняющих (формоизменяющих) операций в основном соответствует рассмотренному в п. 8.8.4 и отличается отсутствием блока 1 (см. рис. 8.46) по выбору модели формирования механических свойств и определением суммарной общей степени деформации $e_{i\phi_\Sigma}$ (вместо $e_{i\text{упр}}$), необходимой для формообразования. Этот алгоритм включает следующие расчетные процедуры:

1. Ввести исходные данные: размеры исходной полой заготовки (d_1, S_1^j, h_1^j); размеры заготовки после первой упрочняющей операции ($d_{1\text{упр}}^j$, $S_{1\text{упр}}^j$, $h_{1\text{упр}}^j$), где индекс $i_{\text{упр}} = n\text{-}2, n\text{-}1, \ldots, n$ в зависимости от количества упрочняющих операций.

2. Рассчитать общую деформацию, обеспечивающую формообразование полой заготовки для первой упрочняющей операции или конечной заготовки, по формулам

$$e_{i\Sigma}^j = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{F_1^j}{F_{1\text{упр}}^j} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{1}{(1-\psi_\Sigma^j)}; \qquad (8.121)$$

$$\psi_\Sigma^j = 1 - \frac{F_{1\text{упр}}^j}{F_1^j} = 1 - m_{d\Sigma}^j m_{S\Sigma}^j; \qquad (8.122)$$

$$m_{d\Sigma}^j = \frac{d_{1\text{упр}}^j}{d_1^j}; \quad m_{S\Sigma}^j = \frac{S_{1\text{упр}}^j}{S_1^j}, \qquad (8.123)$$

где F_1^j, $F_{1\text{упр}}^j$ – площадь поперечного сечения исходной полой заготовки и после первой упрочняющей операции соответственно.

3. Выбрать способ вытяжки: количество матриц, схему последовательной или одновременной вытяжки через две или более матриц, степень деформации в верхней матрице $e_{i\text{в}}^j$, расстояние между матрицами $l_{\text{м}i}$, углы конусности матрицы α_i и β_i, условия трения $f_{\text{м}i}$, $f_{\text{п}i}$.

4. Принять количество неупрочняющих (формоизменяющих) операций n_ϕ=1.

5. Рассчитать коэффициент использования ресурса пластичности $\omega_{i\phi}$ на неупрочняющей (формоизменяющей) операции по методике и моделям, изложенным в п. 8.8.4.

6. Назначить допустимое значение коэффициента использования ресурса пластичности на неупрочняющих (формоизменяющих) операциях [$\omega_{i\phi}$]. При

тяжелых условиях функционирования детали и наличии последующих упрочняющих операций целесообразно принять

$$[\omega_{i\text{ф}}]=0{,}25. \tag{8.124}$$

В этом случае промежуточная термообработка между последней неупрочняющей и первой упрочняющей операциями позволяет полностью восстановить исходные свойства металла и ресурс его пластичности ($\omega_i = 0$). Если требования по механическим свойствам готовой детали не заданы (изделие первой категории), то значение допустимого коэффициента использования ресурса пластичности можно повысить до уровня

$$[\omega_{i\text{ф}}]=0{,}80\ldots0{,}85. \tag{8.125}$$

Для изделий второй категории (со средними требованиями по механическим свойствам) можно принять

$$[\omega_{i\text{ф}}]=0{,}65. \tag{8.126}$$

7. Проверить условие прочности

$$\omega_i^j < \left[\omega_{ii}^j\right]. \tag{8.127}$$

8. Если условие п. 7 выполняется, то принять $n_\text{ф}$=1.

9. Если условие п.7 не выполняется, назначить

$$n_\text{ф}= n_\text{ф}+1. \tag{8.128}$$

10. Далее – по алгоритму расчета количества упрочняющих операций.

8.8.6. Расчет размеров заготовок на промежуточных операциях

Исходные данные:

- размеры заготовки после первой вытяжки (d_1, $d_1^\text{в}$, $d_1^\text{н}$, $S_1^\text{в}$, $S_1^\text{н}$, $h_1^\text{в}$, $h_1^\text{н}$, $S_1^\text{д}$, H_1);
- размеры заготовки после первой упрочняющей операции (n-1-й или n-2-й вытяжки) (d_{n-1}, $d_{n-1}^\text{н}$, d_{n-1}^j,…, $d_{n-1}^\text{в}$, $S_{n-1}^\text{н}$, S_{n-1}^j,…, $S_{n-1}^\text{в}$, $h_{n-1}^\text{н}$, h_{n-1}^j, $h_{n-1}^\text{в}$, r_{n-1}, $S_{n-1}^\text{д}$, H_{n-1});
- количество промежуточных вытяжек $n_\text{ф}$;
- значения показателей степени деформации по операциям в верхнем: $m_{S2}^\text{в}$, $m_{Si}^\text{в}$, $m_{S(n-1)}^\text{в}$, m_{d2}, m_{di}, $m_{d(n-1)}$, $\psi_2^\text{в}$, $\psi_i^\text{в}$, $\psi_{n-1}^\text{в}$ и нижнем $m_{S2}^\text{н}$, $m_{Si}^\text{н}$, $m_{S(n-1)}^\text{н}$, $\psi_2^\text{н}$, $\psi_i^\text{н}$, $\psi_{n-1}^\text{н}$ расчетных сечениях.

Значения степеней деформации в любом расчетном сечении определяют в зависимости от известного количества формоизменяющих операций и суммарных степеней деформации на этих операциях с использованием следующих соотношений:

$$m^j_{d_{\text{ср}\Sigma}} = \prod_{i=1}^{n_\text{ф}} m^j_{d_{\text{ср}1}}\ ;\ m^j_{S\Sigma} = \prod_{i=1}^{n_\text{ф}} m^j_{S_i}\ ;\ \psi^j_i = 1 - m^j_{\text{ср}\,i}\cdot m^j_{Si}\,;$$

$$(1-\psi^j_{i\Sigma}) = \prod_{i=1}^{n_\text{ф}} (1-\psi^j_i)\,;\ e^j_{i\Sigma} = \sum_{i=1}^{n_\text{ф}} e^j_{ii}\,;\ m^j_{d_{\text{ср}\,i}} \ge m^j_{d_{\text{ср}\,i-1}} \ge m^j_{d_{\text{ср}\,i-2}} \ge \ldots;$$

$$m^j_{Si} \ge m^j_{Si-1} \ge m^j_{Si-2} \ge \ldots;\ \psi^j_i \le \psi^j_{i-1} \le \psi^j_{i-2} \le \ldots;\ e^j_i \le e^j_{i-1} \le e^j_{i-2} \le \ldots \quad (8.129)$$

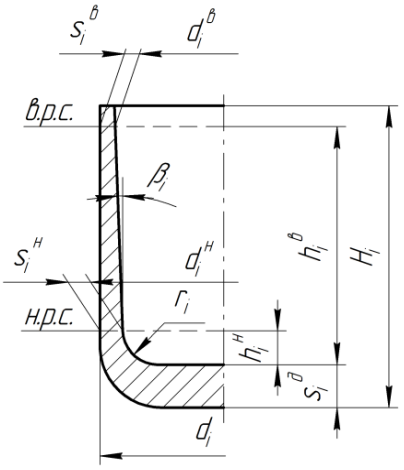


Рис. 8.55. Эскиз заготовки после промежуточной, *i*-й вытяжки

Расчетные размеры заготовки на любой промежуточной операции (рис. 8.55):

- диаметры: d_i, $d_i^н$, $d_i^в$;
- толщина стенки в расчетных сечениях: $S_i^н$, $S_i^в$;
- расстояния расчетных сечений от внутренней поверхности дна: $h_i^н$, $h_i^в$;
- радиусы сопряжения стенки и дна r_i;
- полная высота заготовки H_i;
- допуски на неточность изготовления заготовки по наружному диаметру $T^j_{d_i}$ и разностенность $\delta^j_{\text{р}i}$.

Последовательность расчета и расчетные формулы для определения размеров заготовок по операциям приведены в табл. 8.19.

Т а б л и ц а 8.19

Расчет размеров заготовок на промежуточных вытяжках

Определяемая величина	Расчетная формула	Примечание
1	2	3
Средний диаметр заготовки на *i*-й операции, $d_{\text{ср}_i}$	$d_{\text{ср}_i} = m_{d_i}\cdot d_{\text{ср}(i-1)}$	
Коэффициент вытяжки на *i*-й операции, m_{d_i}		Назначается по опытным данным
Толщина стенки заготовки в верхнем расчетном сечении на *i*-й операции, $S_i^в$	$S_i^в = S_{i-1}^в \cdot m_{Si}^в$	

Продолжение табл. 8.19

1	2	3
Коэффициент утонения стенки в верхнем расчетном сечении заготовки на i-й операции, $m_{Si}^{\text{в}}$		Назначается по опытным данным
Наружный диаметр заготовки на i-й операции, d_i	$d_i = d_{\text{ср}_i} + S_i^{\text{в}}$	
Толщина стенки заготовки в нижнем расчетном сечении на i-й операции, $S_i^{\text{н}}$	$S_i^{\text{н}} = S_{i-1}^{\text{н}} \cdot m_{Si}^{\text{н}}$	
Коэффициент утонения в нижнем расчетном сечении на i-й операции, $m_{Si}^{\text{н}}$		Назначается по опытным данным
Внутренний диаметр заготовки в верхнем расчетном сечении на i-й операции, $d_i^{\text{в}}$	$d_i^{\text{â}} = d_i - 2S_i^{\text{â}}$	
Внутренний диаметр заготовки в нижнем расчетном сечении на i-й операции, $d_i^{\text{н}}$	$d_i^{\text{í}} = d_i - 2S_i^{\text{í}}$	
Расстояние нижнего расчетного сечения от внутренней поверхности дна на i-й операции, $h_i^{\text{н}}$	$h_i^{\text{н}} = r_i(1 - \sin\beta_i)$	
Радиус сопряжения внутренних поверхностей стенки и дна на i-й операции, r_i	$r_i = r_{i-1} - \Delta r$	
Величина изменения радиуса сопряжения по операциям, Δr	$\Delta r = \dfrac{r_1 - r_n}{n-1}$	
Радиус сопряжения на первой вытяжке, r_1		Назначается по рекомендациям
Радиус сопряжения на последней вытяжки, r_n		Назначается по рекомендациям
Угол наклона образующей поверхности стенки заготовки к ее оси на i-й операции, β_i	$\beta_i = 0°15' \ldots 1°30$	
Расстояние верхнего расчетного сечения от внутренней поверхности дна: на n–1-й операции, $h_{n-1}^{\text{в}}$ на i-й операции, $h_i^{\text{в}}$	См. п. 8.7.5 $h_i^{\text{в}} = h_i^{\text{н}} + (h_{i+1}^{\text{в}} - h_{i+1}^{\text{н}})C_{h_i}$	Расчет положений расчетных сечений ведется от n–1-й операции
Коэффициент изменения высоты на i-й операции, $C_{h\,i}$	$C_{h_i} = m_{Si}\dfrac{1 + C_{S_{(i+1)}}}{1 + C_{S_i}}$	

Окончание табл. 8.19

1	2	3
Коэффициент уменьшения толщины стенки заготовки от нижнего к верхнему расчетному сечению: на (i+1)-й операции, $C_{S(i+1)}$ на 1-й операции, C_{Si}	$C_{S(i+1)} = \frac{S_{i+1}^{\text{в}}}{S_{i+1}^{\text{н}}}$ $C_{Si} = \frac{S_i^{\text{в}}}{S_i^{\text{н}}}$	
Толщина дна заготовки: на i-й операции, $S_i^{\text{д}}$ на i–1-й операции, $S_{(i-1)}^{\text{д}}$	$S_i^{\text{д}} \cong C_S S_{(i-1)}$ См. п. 8.9.5	$C_S = 1,0 \ldots 1,1$
Высота заготовки на i-й операции, H_i	$H_i = S_i + h_i^{\text{в}} +$ $+ (S_{i+1} + h_{i+1}^{\text{в}} - S_{i+1}^{\text{в}}) \times$ $\times m_{d_{i-1}} \cdot m_{S_{i-1}}^{\text{в}}$	

В табл. 8.20 приведены значения показателей степени деформации на вытяжных операциях, применявшихся в заводской практике.

Т а б л и ц а 8.20

Степени деформации на вытяжках из полых заготовок, применяемых при изготовлении гильз в заводской практике

Клб. изделий, мм	№ операции	Количество матриц	Показатели степени деформации								
			m_d			m_s			ψ		
			верх.	нижн	$m_{d\Sigma}$	верх.	нижн	$m_{s\Sigma}$	верх	ниж.	ψ_Σ
5,45	1	2	0,93	0,93	0,86	0,81	0,71	0,57	0,25	0,34	0,51
	2	2	0,94	0,98	0,92	0,62	0,79	0,49	0,42	0,22	0,55
	3	2	0,95	0,99	0,94	0,71	0,92	0,66	0,67	0,09	0,38
7,62-ВТ	1	1	0,85	-	0,85	0,37	-	0,37	0,68	-	0,68
	2	2	0,90	0,99	0,89	0,66	0,93	0,61	0,41	0,08	0,46
	3	2	0,91	0,97	0,88	0,82	0,90	0,74	0,26	0,13	0,32
	4	2	0,98	0,99	0,97	0,70	0,84	0,59	0,32	0,17	0,43
14,5	1	2	0,69	0,94	0,65	0,59	0,79	0,46	0,59	0,26	0,70
	2	2	0,95	0,98	0,93	0,99	0,83	0,82	0,06	0,19	0,24
	3	2	0,98	0,95	0,93	0,79	0,84	0,66	0,23	0,20	0,39
	4	2	0,99	0,98	0,97	0,93	0,74	0,68	0,08	0,28	0,34
12,7	1	2	0,71	0,94	0,67	0,69	0,65	0,45	0,51	0,39	0,70
	2	1	0,97	-	0,97	0,72	-	0,72	0,30	-	0,30
	3	1	0,95	-	0,95	0,55	-	0,55	0,48	-	0,48

Допуски на неточность изготовления заготовок по наружному диаметру назначаются по таблицам допусков и производственным данным: на операциях первой и второй вытяжки – по 11–13-му квалитетам точности, на промежуточных и финишных операциях – по 11–12-му квалитетам.

Допустимая разностенность устанавливается для нижнего и верхнего расчетных сечений ($\Delta S_i^{\text{н}}$, $\Delta S_i^{\text{В}}$) в соответствии с заводскими рекомендациями, а для конечных заготовок – в соответствии с ТУ на изготовление деталей.

8.8.7. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента

Исходные данные для расчета:

- номинальные размеры заготовок после выполнения каждой из операций: d_i, $d_i^{\text{н}}$, d_i^j, $d_i^{\text{в}}$, $S_i^{\text{н}}$, S_i^j, $S_i^{\text{в}}$, $h_i^{\text{н}}$, h_i^j, $h_i^{\text{в}}$, r_i, H_i;
- допуски на неточность изготовление заготовок на каждой из операций: T_{di}, $T_{Si}^{\text{н}}$, T_{Si}^j, $T_{Si}^{\text{в}}$;
- допуски на разностенность: $T_p^{\text{н}}$, …, T_p^j, …, $T_p^{\text{в}}$;
- расчетные исполнительные размеры рабочего инструмента на каждой операции (рис. 8.56, 8.57):
- диаметр цилиндрического пояска матрицы: $d_{\text{м}i}$;
- диаметры пуансонов в расчетных сечениях: $d_{\text{п}i}^{\text{н}}$, $d_{\text{п}i}^j$, $d_{\text{п}i}^{\text{в}}$;
- расстояния расчетных сечений от торца пуансона: $h_{\text{п}i}^{\text{н}}$, $h_{\text{п}i}^j$, $h_{\text{п}i}^{\text{в}}$;
- радиусы сопряжения боковых и торцовых поверхностей пуансона: $R_{\text{п}i}$, $r_{\text{п}i}$;
- высота рабочей части пуансона $H_{\text{п}i}$.

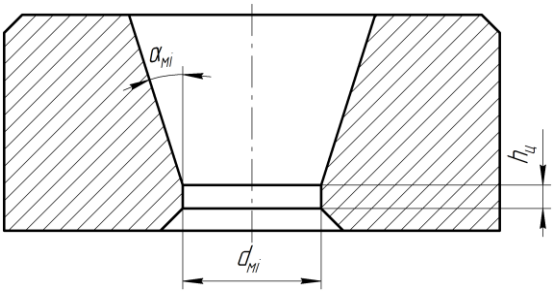


Рис. 8.56. Эскиз матрицы

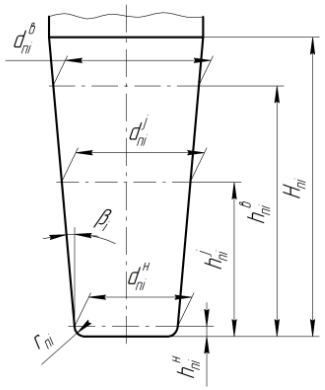


Рис. 8.57. Эскиз пуансона

Перечисленные размеры определяют размеры получаемых заготовок и деталей.

Исполнительные размеры рабочего инструмента рассчитываются по номинальным размерам заготовки с учетом допустимых отклонений на размеры, величины допустимой разностенности, степени и направления износа пуансона и матрицы, а также упругих и температурных деформаций заготовки и инструмента.

Проектируемый инструмент должен в начале эксплуатации обеспечивать изготовление заготовки (детали) с максимальным приближением к ее номинальным размерам, а именно, наименьшим из допустимых по наружному диаметру, толщинам стенки в расчетных сечениях. В процессе эксплуатации происходит износ цилиндрического пояска матрицы и рабочей части пуансона. Следствием этого является увеличение диаметра матрицы $d_{\text{м}}$, уменьшение диаметров пуансона в расчетных сечениях ($d_{\text{п}}^{\text{н}}$, $d_{\text{п}}^{j}$, $d_{\text{п}}^{\text{в}}$), увеличение наружного диаметра заготовки d_i и толщин стенок в расчетных сечениях ($S_i^{\text{н}}$, S_i^{j}, $S_i^{\text{в}}$) (рис. 8.58).

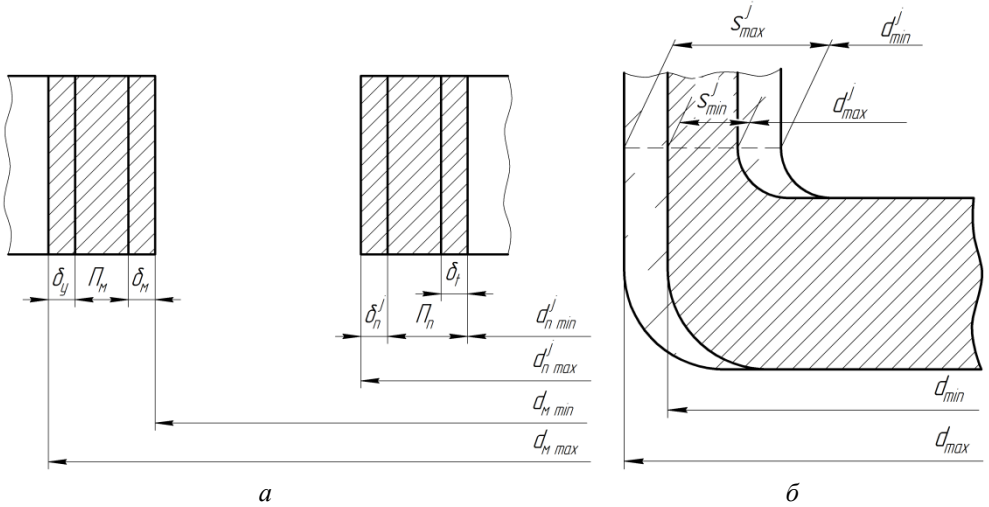


Рис. 8.58. Схема полей допусков рабочего инструмента (*а*) и заготовки (*б*)

Принимаемые в расчетах суммарные припуски на износ инструмента ($П_{\text{м}} + П_{\text{п}}$) должны назначаться в зависимости от допустимых отклонений на наружный диаметр T_{di} и толщину стенки ($\Delta S_i^{\text{н}}$, ΔS_i^{j}, $\Delta S_i^{\text{в}}$) и с учетом допусков на разностенность $T_{\text{р}}$, упругих и температурных деформаций заготовки и инструмента (δ_y, δ_t). При этом предусматривается, что суммарный

припуск на износ включает в себя и припуски на механическую обработку, назначаемые при однократном или многократном восстановлении (например, с целью удаления поверхностных дефектов типа царапин, задиров, появляющихся при эксплуатации).

В общем случае исполнительные размеры рассчитываются по формулам

$$d_{\text{м}} = \left(d_{\max} - \Pi_{\text{м}} - T_{\text{м}} - \delta_{\text{у}}\right)^{+T_{\text{м}}} = \left(d_{\max} - T_d - \delta_{\text{у}}\right)^{+T_{\text{м}}}, \qquad (8.130)$$

$$d_{\text{п}}^{j} = \left(d_{\min}^{j} + \Pi_{\text{п}}^{j} - \delta_t + T_{\text{п}}^{j}\right)_{-T_{\text{п}}^{j}}, \qquad (8.131)$$

где $d_{\text{м}}$ – исполнительный размер матрицы; $d_{\text{п}}^{j}$ – исполнительный размер пуансона в расчетном сечении j; $d_{\max} = d + \Delta d_{\text{в}}$ – максимальный наружный диаметр заготовки; d – номинальный (расчетный) размер заготовки по наружному диаметру; $\Delta d_{\text{в}}$ – верхнее допускаемое отклонение наружного диаметра заготовки (при $\Delta d_{\text{в}} = 0$, $d_{\max} = d$); $T_d = \Pi_{\text{м}} + T_{\text{м}}$ – допуск на неточность изготовления заготовки по наружному диаметру; $\Pi_{\text{м}}$ – припуск на износ матрицы; $T_{\text{м}}$ – допуск на неточность изготовления матриц; $\delta_{\text{у}} = \delta_{\text{ум}} + \delta_{\text{уд}}$ – суммарная упругая деформация; $\delta_{\text{ум}}$ – упругая деформация матрицы; $\delta_{\text{уд}}$ – упругая разгрузка (распружинивание) заготовки после вытяжки; $d_{\min}^{j} = d^{j} + \Delta d_{\text{н}}^{j}$ – минимальный внутренний диаметр заготовки в расчетном сечении j; d^{j} – номинальный (расчетный) внутренний диаметр; $\Delta d_{\text{н}}^{j}$ – нижнее допускаемое отклонение на внутренний диаметр заготовки (при $\Delta d_{\text{н}}^{j} = 0$, $d_{\min}^{j} = d^{j}$); $\Pi_{\text{п}}^{j}$ – припуск на износ пуансона в расчетном сечении; δ_t – термическая деформация пуансона; $T_{\text{п}}^{j}$ – допуск на неточность изготовления пуансона в расчетном сечении j.

Припуск на износ матрицы и пуансона определяется из формул

$$\Pi_{\text{м}} = T_d - T_{\text{м}}, \qquad (8.132)$$

$$\Pi_{\text{п}}^{j} = 2T_S^{j} - \Pi_{\text{м}} - T_{\text{м}} - T_{\text{п}}^{j} - 2T_{\text{р}}^{j}, \qquad (8.133)$$

где T_S^{j} – допуск на неточность изготовления заготовки (детали) по толщине в расчетном сечении j; $T_{\text{р}}^{j}$ – допуск на разностенность в расчетном сечении j.

Допуски по толщине стенки детали назначаются по чертежу и ТУ на ее изготовление или, при отсутствии указаний, по 14–16-му квалитетам точности, допуски на размеры рабочего инструмента – по 7–9-му квалитетам.

При отсутствии допусков на толщину стенки припуски на износ пуансонов могут назначаться для первой и промежуточных вытяжек

$$П_{\text{п}} \approx |h8|, \qquad (8.134\text{а})$$

для финишных операций вытяжки

$$П_{\text{п}} = (0 \div 0{,}25)|h8|, \qquad (8.134\text{б})$$

где $|h8|$ – допуск на внутренний диаметр заготовки $d^{\,j}$, назначается по 8-му квалитету точности.

Величина допусков при расчете исполнительных размеров рабочего инструмента назначается в соответствии с ЕСДП СЭВ (стандартные СТ СЭВ 144-75 и 145-75).

Величины упругих и температурных деформаций определяются из следующих приближенных соотношений:

$$\delta_{\text{ум}} = (0{,}001\ldots0{,}003)d \qquad (8.135\text{а})$$

– для матриц, изготовленных из инструментальных углеродистых сталей;

$$\delta_{\text{ум}} = (0{,}005\ldots0{,}007)d \qquad (8.135\text{б})$$

– для твердосплавных матриц;

$$\delta_{\text{уд}} = (0{,}05\ldots0{,}07)S_{\text{ср}};\ \delta_t = (0{,}001\ldots0{,}0015)\cdot d^{\,j};\ S_{\text{ср}} = (S^{\text{н}} + S^{\text{в}})/2. \qquad (8.136)$$

При невысокой точности штампуемых заготовок (деталей) упругие и термические дефрмации не учитываются.

Линейные размеры и радиусы сопряжения поверхностей рабочего инструмента назначаются по соответствующим номинальным размерам заготовок:

$$h_n^j = h^j, \qquad r_n = r_i. \qquad (8.137)$$

Последовательность расчета размеров рабочего инструмента и расчетные формулы приведены в табл. 8.21.

Таблица 8.21

Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента

Определяемая величина	Расчетная формула	Примечание
1	2	3
1. На *i*-х операциях Размеры матриц: диаметр матрицы, $d_{\text{м}i}$	$d_{\text{м}i} = (d_i - T_{di} - \delta_{\text{у}i})^{+T_{\text{м}i}}$	При вытяжке через одну матрицу
диаметр верхней матрицы, $d'_{\text{м}i}$ диаметр нижней матрицы, $d''_{\text{м}i}$	$d'_{\text{м}i} = (d'_i - T'_{di} - \delta'_{\text{у}i})^{+T'_{\text{м}i}}$ $d''_{\text{м}i} = (d_i - T''_d - \delta''_{\text{у}i})^{+T''_{\text{м}i}}$	При вытяжке через две матрицы

Продолжение табл. 8.21

1	2	3
Суммарная упругая деформация матрицы и заготовки: вытяжка через одну матрицу, δ_{yi} вытяжка через две матрицы, δ'_{yi}, δ''_{yi}	$\delta_{yi} = 0{,}0015d_i + 0{,}05S_{i\text{ср}}$ $\delta'_{yi} = \delta''_{yi} = 0{,}0015d_i + 0{,}025S_{i\text{ср}}$	
Средняя толщина стенки заготовки после вытяжки, $S_{\text{ср}i}$	$S_{\text{ср}i} = \frac{S_i^{\text{в}} + S_i^{\text{н}}}{2}$	
Допускаемые отклонения на размеры матриц, $T_{\text{м}i}, T'_{\text{м}i}, T''_{\text{м}i}$	$T_{\text{м}i}, T'_{\text{м}i}, T''_{\text{м}i} = \lvert H8 \rvert$	Назначаются на диаметры матриц по 8-му квалитету точности
Угол конусности матриц, $\alpha_n, \alpha'_n, \alpha''_n$	$\alpha_n = \alpha'_n = \alpha''_n = 7^{\text{o}} \ldots 15^{\text{o}}$	
Высота цилиндрического пояска матриц, $h_{\text{ц}i}$	$h_{\text{ц}i} = (0{,}03 \ldots 0{,}05) d_{\text{м}i}$	
Диаметр пуансона: в нижнем расчетном сечении, $d_{\text{п}i}^{\text{н}}$ в верхнем расчетном сечении, $d_{\text{п}i}^{\text{в}}$	$d_{\text{п}i}^{\text{н}} = \left(d_i^{\text{н}} + \Pi_{\text{п}i}^{\text{н}} + T_{\text{п}i}^{\text{н}}\right)_{-T_{\text{п}i}^{\text{в}}}$ $d_{\text{п}i}^{\text{в}} = \left(d_i^{\text{в}} + \Pi_{\text{п}i}^{\text{в}} + T_{\text{п}i}^{\text{в}}\right)_{-T_{\text{п}i}^{\text{в}}}$	
Припуск на износ пуансона: в нижнем расчетном сечении, $\Pi_{\text{п}i}^{\text{н}}$	$\Pi_{\text{п}1}^{\text{н}} = \Delta d_{\text{п}1}^{\text{н}}$	Для первой вытяжки
	$\Pi_{\text{п}i}^{\text{н}} = (0{,}5 \ldots 0{,}75) T_{d_{\text{п}i}}^{\text{н}}$	Для промежуточных вытяжек
в верхнем расчетном сечении, $\Pi_{\text{п}i}^{\text{в}}$	$\Pi_{\text{п}1}^{\text{в}} = \Delta d_{\text{п}1}^{\text{в}}$	Для первой вытяжки
	$\Pi_{\text{п}i}^{\text{в}} = (0{,}5 \ldots 0{,}75) T_{d_{\text{п}i}}^{\text{в}}$	Для промежуточных вытяжек
Допуск на неточность изготовления пуансона: в нижнем расчетном сечении, $T_{d_{\text{п}i}}^{\text{н}}$	$T_{d_{\text{п}i}}^{\text{н}} = \lvert h8 \rvert$	Назначаются на диаметры пуансона по 8-му квалитету точности
в верхнем расчетном сечении, $T_{d_{\text{п}i}}^{\text{в}}$	$T_{d_{\text{п}i}}^{\text{в}} = \lvert h8 \rvert$	Назначаются на диаметры пуансона по 8-10-му квалитетам точности
Допускаемые отклонения на размеры пуансона, $T_{d_{\text{п}i}}^{\text{в}}$, $T_{d_{\text{п}i}}^{\text{н}}$		
Расстояние от торца пуансона: до нижнего расчетного сечения, $h_{\text{п}i}^{\text{н}}$ до верхнего расчетного сечения, $h_{\text{п}i}^{\text{в}}$	$h_{\text{п}i}^{\text{н}} = h_i^{\text{н}}$ $h_{\text{п}i}^{\text{в}} = h_i^{\text{в}}$	

Продолжение табл. 8.21

1	2	3
Радиус сопряжения боковой и торцовой поверхности пуансона, $r_{пi}$	$r_{пi} = r_i$	
Высота рабочей (конической) части пуансона, $H_{п1}, H_{пi}$	$H_{п1} = (1{,}2\ldots1{,}5)\left(h_1^{в} - h_1^{н}\right) + h_1^{н}$	Для первой вытяжки
	$H_{пi} = \left(H_i - S_{дi}\right) + (10\ldots15)$ мм	Для промежуточных вытяжек
2. На финишных операциях Размеры матриц: диаметр матрицы, $d_{мп}$	$d_{мп} = \left(d_n - T_d - \delta_{уп}\right)^{+T_{мп}}$	При вытяжке через одну матрицу
диаметр верхней матрицы, $d'_{мп}$	$d'_{мп} = \left(d'_n - T'_d - \delta'_{уп}\right)^{+T'_{мп}}$	При вытяжке через две матрицы
диаметр нижней матрицы, $d''_{мп}$	$d''_{мп} = \left(d_n - T''_d - \delta''_{уп}\right)^{+T''_{мп}}$	
Суммарная упругая деформация матрицы и заготовки: вытяжка через одну матрицу, $\delta_{уп}$ вытяжка через две матрицы, $\delta'_{уп}$, $\delta''_{уп}$	$\delta_{уп} = (0{,}002\ldots0{,}003)d_n + 0{,}07S_{nср}$ $\delta'_{уп} = \delta''_{уп} = (0{,}002\ldots0{,}003)d_n + 0{,}035S_{nср}$	
Средняя толщина стенки заготовки после вытяжки, $S_{срп}$	$S_{срп} = \dfrac{S_n^{в} + S_n^{н}}{2}$	
Допускаемые отклонения на размеры матриц, $T_{мп}, T'_{мп}, T''_{мп}$	$T_{мп}, T'_{мп}, T''_{мп} = \lvert H7\rvert - \lvert H9\rvert$	Назначаются на диаметры матриц по 7-9-му квалитетам точности
Угол конусности матриц, $\alpha_n, \alpha'_n, \alpha''_n$	$\alpha_n = \alpha'_n = \alpha''_n = 7^{o}\ldots15^{o}$	
Высота цилиндрического пояска матриц, $h_{ц}$	$h_{ц} = (0{,}05\ldots0{,}07)d_{мп}$	
Диаметр пуансона в любом расчетном сечении j, $d_{ппп}^{j}$	$d_{ппп}^{j} = \left(d_{п}^{j} + П_{пп}^{j} + T_{пп}^{j} - \delta_t^{j}\right)_{-T_{пп}^{j}}$	
Припуск на износ пуансона в любом расчетном сечении j, $П_{пп}^{j}$	$П_{пп}^{j} = (0\ldots0{,}25)T_{d_{пп}}^{j}$	
Допуск на неточность изготовления пуансона в любом расчетном сечении j, $T_{d_{пп}}^{j}$	$T_{d_{пп}}^{j} = \lvert h8\rvert$	
Допускаемое отклонение на размеры пуансона в любом расчетном сечении j, $T_{пп}^{j}$		Назначаются на диаметры пуансона, $d_{пп}^{н}$, $d_{пп}^{j}$, $d_{пп}^{в}$
Термическая деформация пуансона в любом расчетном сечении j, δ_t^{j}	$\delta_t^{j} = (0{,}005\ldots0{,}010)d_{i\,n}^{j}$	

Окончание табл. 8.21

1	2	3
Расстояние от торца пуансона любого расчетного сечения j, $h_{пп}^{j}$	$h_{пп}^{j} = h_{п}^{j}$	
Радиус сопряжения боковоых и торцовых поверхностей пуансона, $r_{пп}$	$r_{пп} = r_{п}$	
Высота рабочей (конической) части пуансона, $H_{пп}$	$H_{пп} = (H_{п} - S_{дп}) + (10\ldots15)$мм	
3. Проверка обеспечения заданных допустимых отклонений по толщинам стенки заготовки		
Допустимые отклонения на любой (включая финишные операции) i-й вытяжке: в любом расчетном сечении j, $\left[\Delta S_i^{j}\right]$	$\left[\Delta S_i^{j}\right] = \dfrac{T_{d_{пi}}^{j} + П_{пi}^{j} + T_{пi}^{j}}{2} + T_{рi}^{j}$	
Допустимая разностенность на любой i-й вытяжке:в любом сечении j, $T_{рi}^{j}$		Назначается в соответствии с производственными данными

8.8.8. Конструкция вытяжного инструмента

Комплект рабочего инструмента для вытяжки состоит из пуансона, одной или нескольких матриц и устройства для снятия полуфабриката с пуансона после вытяжки (съемки). Пуансон свертки и вытяжки представляет собой стержень, состоящий из рабочей части, осуществляющий формоизменение заготовки, и крепежной части, предназначенной для крепеления к ползуну пресса или инструментального блока АРЛ.

Методика расчета исполнительных размеров рабочей части пуансонов приведена в п. 8.8.7.

Существенное влияние на качество получаемых полуфабрикатов и деталей оказывает величина зазора между пуансоном и полуфабрикатом в нижнем расчетном сечении. Рекомендуется принимать

$$d^{н}_{i-1} - d^{н}_{i} = 0{,}10 + 0{,}35 \text{ мм}.$$

Верхние значения зазоров рекомендуется назначать для полуфабрикатов крупного калибра.

Увеличение зазора приводит к утолщению стенок полуфабриката и к увеличению брака по косине и разностенности. Уменьшение зазора неизбежно приводит к образованию наплывов в зоне «угла» полуфабриката вследствие плотного вхождения пуансона. Наплывы в зоне угла служат причиной образования складок в дне гильзы, понижающих ее прочность (рис. 8.59).

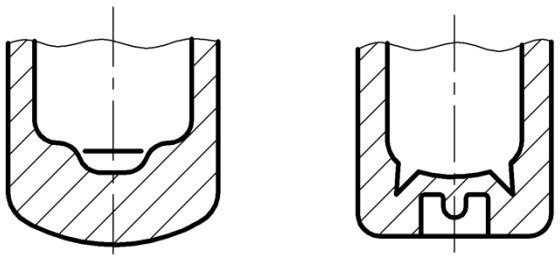


Рис. 8.59. Наплывы в зоне сопряжения стенки и дна («угла») полуфабриката:
а – после последней вытяжки; *б* – образование складок после штамповки дна

На качество вытяжки влияет также радиус закругления пуансона. Установлено, что:

- большие радиусы закругления улучшают условия течения металла при вытяжке, но способствуют накоплению металла в дне и образованию наплывов, как и при малых зазорах;
- малые радиусы затрудняют течение металла и приводят к образованию значительных остаточных напряжений в зоне угла.

Рекомендуется либо непрерывное уменьшение, либо увеличение радиуса от первой к последней вытяжке.

Применяется несколько типов пуансонов в зависимости от формы рабочей части (рис. 8.60).

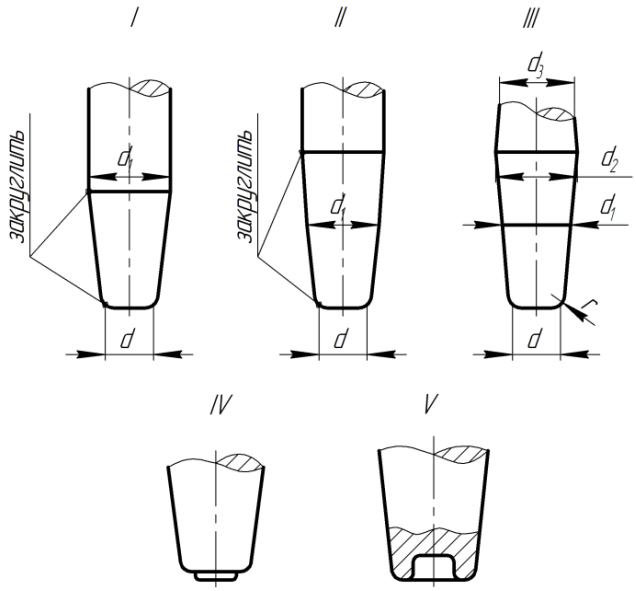


Рис. 8.60. Профили рабочей части пуансонов вытяжки

Пуансон I типа имеет коническую форму и применяется для первых вытяжек гильз и для всех вытяжек пульных оболочек, стаканчиков и других элементов. Рабочая часть пуансона II типа имеет двойную конусность и применяется на последних вытяжных операциях. Пуансон III типа имеет обратный конус, способствующий лучшему съему вытянутого полуфабриката с пуансона и при тонких стенках – уменьшению брака по продольным трещинам. Пуансон IV типа с уступом (грибком) применяется для увеличения запаса металла в дне на первых вытяжных операциях. Пуансон V типа применяется в тех случаях, когда между вытяжными операциями вводится операция штамповки дна с образованием в донной части полуфабриката выступа.

Типы форм рабочей части пуансонов свертки показаны на рис. 8.61: I – для свертки без утонения; II – для свертки с утонением; III – пуансон с «грибком», применяется при необходимости накопления металла в дне. В тех случаях, когда перепад между диаметрами пуансонов свертки и первой вытяжки больше 2 мм, целесообразно использовать пуансоны со срезанным торцом, улучшающие центрирование полуфабриката.

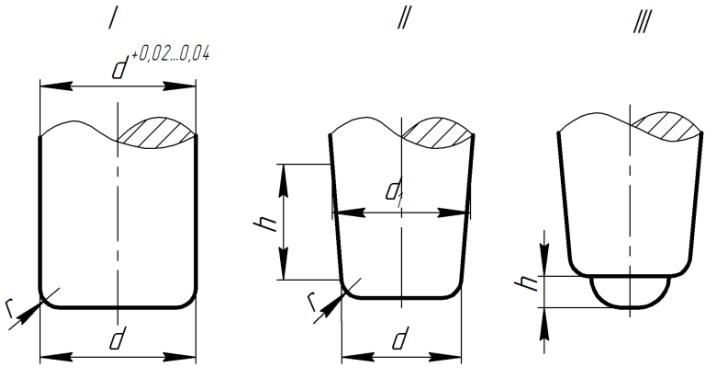


Рис. 8.61. Профили рабочей части пуансонов свертки

Конструкция крепежной части пуансона зависит от способов крепления (рис. 8.62).

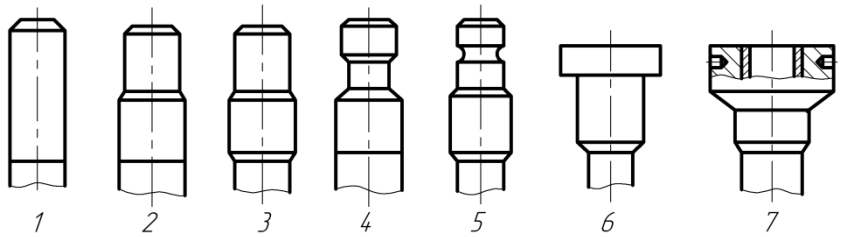


Рис. 8.62. Типовые конструкции крепежной части пуансонов

При относительно легких условиях работы (меньших усилий съема полуфабриката с пуансона) применяются конструкции крепежной части типа 1,2,3, например при вытяжке полуфабрикатов пульных оболочек, а также гильз малых калибров.

При более тяжелых условиях работы (больших усилиях съема) применяются конструкции крепежной части пуансонов типа 4,5, например для вытяжки крупнокалиберных гильз. Пуансоны для вытяжки без утонения выполняются с незначительной конусностью $\beta \leq 3°$ или цилиндрическими. Возможно применение двусторонних пуансонов при длине рабочей части меньшей длины крепежной части пуансона и при цанговым креплении.

Пуансоны изготавливаются из стали У10А-У12А с твердостью после термообработки: рабочей части 57-62 *HRC*; крепежной части 35-50 *HRC*. Для повышения износоустойчивости рабочая поверхность пуансонов хромируется на глубину 0,01 – 0,02 мм.

Расчет исполнительных размеров матриц приведен в п. 8.9.7. Конструктивные варианты матриц, применяемых в производстве, показаны на рис. 8.63, 8.64.

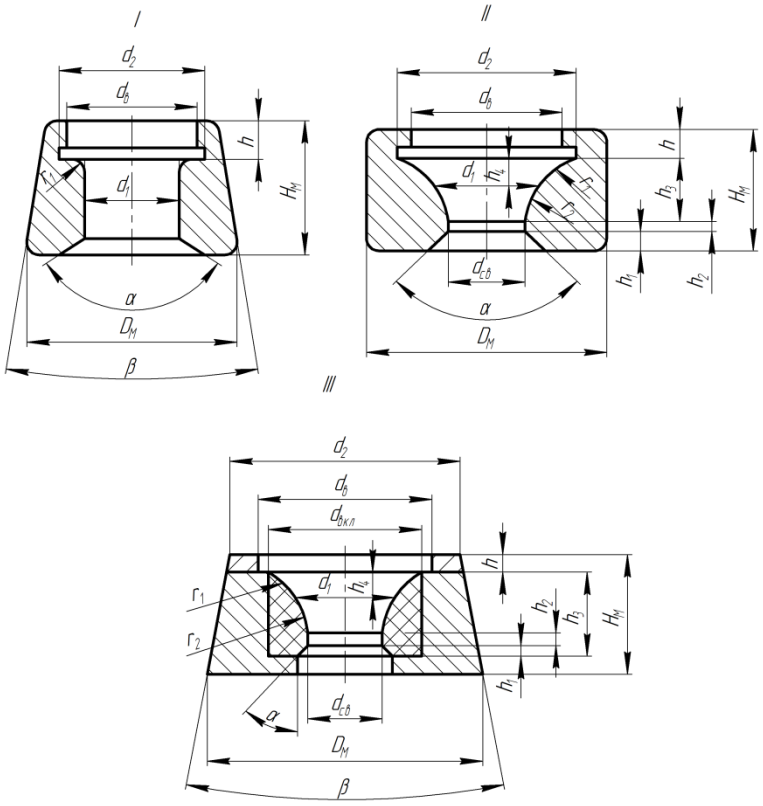


Рис. 8.63. Типовые конструкции матриц вырубки–свертки

На операциях «вырубка–свертка» и «свертка» по форме профиля рабочей части различают матрицы с радиусным закруглением – тип I и эвольвентным профилем – тип II и III. По конструкции различают сплошные – тип I и II и составные матрицы – тип III. В составных матрицах применяют вкладыши из твердых сплавов.

По профилю рабочей части вытяжных матриц можно выделить два основных типа: с цилиндрической направляющей частью – тип I, II и без цилиндрической направляющей части – тип III,IV (см. рис. 8.64).

По конструкции различают цельные матрицы (тип II, IV) и составные с применением твердосплавных вкладышей (тип I, III).

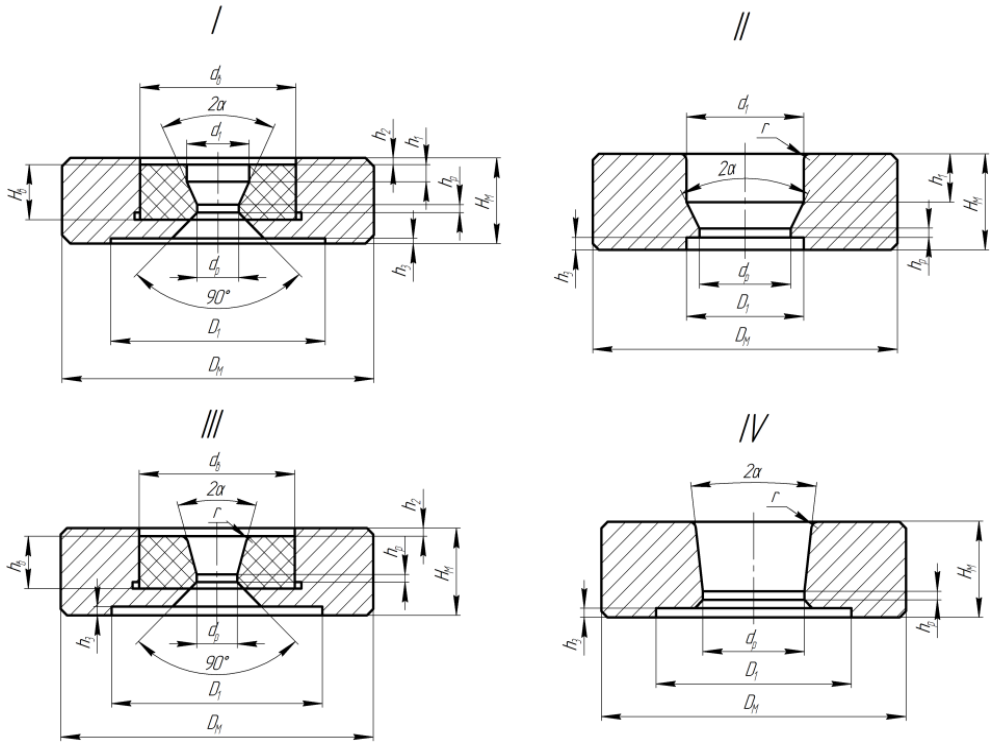


Рис. 8.64. Типовые конструкции вытяжных матриц

Матрицы I и II типа применяются в качестве верхних матриц на 1-й и 2-й вытяжках с целью обеспечения центрирования полуфабрикатов при изготовлении большинства металлических элементов патронов. Матрицы III и IV типа применяются в качестве нижних матриц на первых и последующих вытяжках и в качестве верхних – на последующих вытяжках.

Твердосплавные матрицы находят в настоящее время широкое применение. Более жесткие условия работы твердосплавных матриц возникают на свертке и первых вытяжках при значительных степенях деформации вследствие возникновения значительных окружных растягивающих напряжений, которые могут привести к их разрушению. В этом смысле целесообразно применение бандажированных матриц.

В табл. 8.22-8.24, составленных по заводским данным, приведены основные относительные конструктивные размеры матриц и пределы их изменения.

Таблица 8.22

Относительные конструктивные размеры сверточных (вырубно- сверточных) матриц

Тип матриц	Калибр детали, мм	$\frac{d_1}{d_{св}}$	$\frac{d_2}{d_{св}}$	$\frac{d_в}{d_{св}}$	$\frac{D_м}{d_{св}}$	$\frac{d_{вкл}}{d_{св}}$	$\frac{h}{d_{св}}$	$\frac{h_1}{d_{св}}$	$\frac{h_2}{d_{св}}$	$\frac{h_3}{d_{св}}$	$\frac{h_4}{d_{св}}$	$\frac{H_м}{d_{св}}$	$\frac{r_1}{d_{св}}$	$\frac{r_2}{d_{св}}$	α, град	β,
I	7,62	1,09	1,81	1,71	2,98	-	0,37	0,13	0,21	1,30	-	2,02	0,30	0,41	120	8
II	12,7	1,48	1,63	1,73	3,00	-	0,24	0,04	0,06	0,49	0,045	0,83	0,34	0,52	120	-
III	14,5	1,20	2,26	1,77	2,56	1,58	0,18	0,04	0,05	0,59	0,104	0,90	0,22	0,79	45	20

Таблица 8.23

Конструктивные параметры матриц свертки

Параметры	Толщина заготовки, мм					
	0,6	0,99	1,37	2,9	3,2	8,4
$R_м$ – радиус закругления матрицы (мм)	4	2,5…6	6…12,5	2,2…10	2,5	6,5…9,5
Угол конической части, α°	30	9…25	12…20	12…17	12	25
Высота цилиндрического пояска h, мм	0,5	0,9…25	1,5	1…2,3	1,3	1,5…2
$r_п$ – радиус закругления, мм	1,5	1,5…3	2,0…4,5			

Таблица 8.24

Относительные конструктивные размеры вытяжных матриц

Тип матрицы	Относительные размеры								Абсолютные размеры, мм		
	$d_1/d_р$	$D_1/d_р$	$D_м/d_р$	$d_в/d_р$	$h_м/d_р$	$h_1/d_р$	$h_в/d_р$	$H_м/d_р$	h_2	h_3	h
I	1,01-1,1	3,10-3,50	4,0-4,5	2,0-2,05	0,035-0,040	0,50-0,60	0,95-1,10	1,20-1,40	1,0	0,5	1,0
III	1,06-1,22	1,10-1,9	2,4-2,8	-	0,06-0,09	0,50-1,15	-	0,80-1,40	-	0,5-2,0	1,5-2,0
II	-	1,20-4,10	2,6-5,2	1,7-2,6	0,04-0,13	-	0,45-1,70	0,70-2,0	1,0-1,5	0,5	1,0-3,0
IV	-	1,9-2,7	2,5-3,6	-	0,06-0,10	-	-	0,70-1,40	-	0,5	1,0-2,5

Примечание. Большие значения размеров принимаются для последних вытяжек и меньших диаметральных размеров изделий (полуфабрикатов).

Профиль рабочей части вытяжных матриц может быть выполнен как сопряжение сферической и конической поверхностей или по одной конической поверхности. Последний тип наиболее распространен. На трех первых вытяжках угол конусности матрицы следует брать в пределах 18…25°, на последних вытяжных операциях 5…7°. При вытяжке латунных гильз такой угол будет способствовать уменьшению остаточных напряжений в стенках гильз и склонности к коррозионному растрескиванию.

При вытяжке без утонения и прижима возможно применение профиля рабочей части матриц нескольких типов (рис. 8.65).

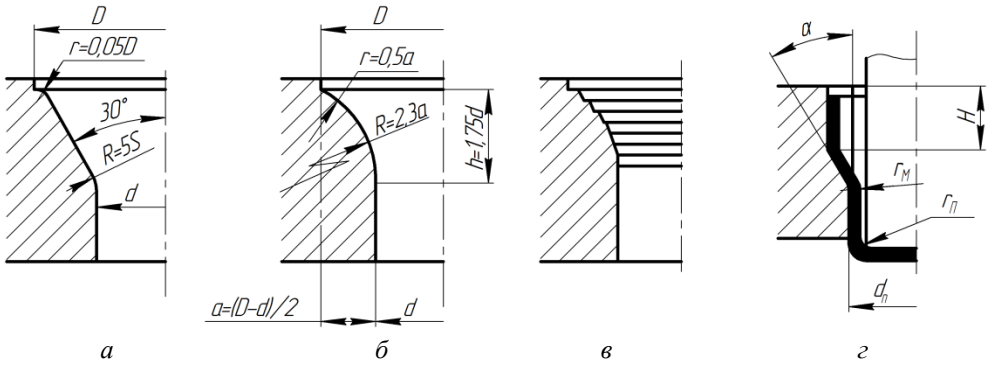


Рис. 8.65. Профили рабочей части матриц для вытяжки без утонения: *а* – конический; *б* – эвольвентный; *в* – ступенчатый; *г* – с глубокой « реактивной» полостью

Для первой вытяжки без прижима применяют матрицы с коническим и эвольвентным профилями.

Как показывает опыт ряда заводов, лучшие результаты дает эвольвентный профиль. Иногда вытяжка без прижима производится в матрице, рабочая полость которой выполняется в виде ступеней, расположенных по эвольвенте, что позволяет получать высокие степени деформации. Ступенчатая форма способствует удержанию смазки на поверхности штампуемой детали.

При многооперационной вытяжке без промежуточных отжигов рекомендуются матрицы с глубокой реактивной полостью, предложенные И.А. Норицыным. Такая матрица предохраняет краевую часть предварительно вытянутого колпачка от разрушающего его изгибающего момента за счет создания подпора по наружной поверхности. Угол наклона конической части $\alpha = 12°$, высота заходной части $H = 0{,}6\ d_{\text{п}}$, радиусы закругления: матрицы $r_{\text{м}} = (8+10)\ S_0$, пуансона $r_{\text{п}} \approx 6S_0$.

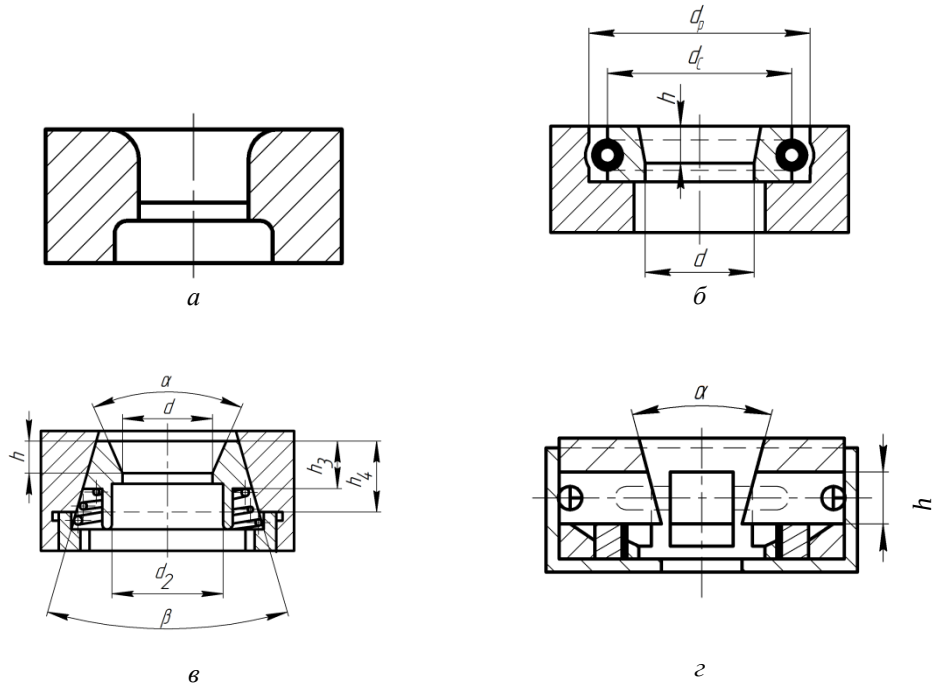
Вытяжные матрицы изготавливаются из углеродистых инструментальных сталей У10-У12А, составные с вкладышами из твердых сплавов типа ВК6, ВК15.

Стойкость матриц с твердотельными вкладышами в 20…25 раз выше, чем остальных. Корпус составных матриц изготавливают из сталей У8-У10.

Матрицы подвергаются термообработке до твердости: для стальных матриц 58-64 HRC; для вкладышей твердого сплава 84-88 HRC.

Рабочая поверхность цельных матриц хромируется на 0,01…0,02 мм.

Различные конструкции применяемых съемок показаны на рис. 8.66. Тип «а» применяется для съема полуфабрикатов с толстыми стенками. Тип «б» может применяться для толстостенных и тонкостенных изделий. Основным недостатком съемки типа «б» является возможность её застопоривания вследствие загрязнения. Наиболее широко применяется съемка типа «в». Съемка типа «г» применяется в основном при глубокой вытяжке толстостенных полуфабрикатов.



а *б* *в* *г*

Рис. 8.66. Конструкции устройств для съема полуфабрикатов с вытяжного пуансона: *а* – съем выточкой в матрице; *б*, *в* – секторная съемка; *г* – кулачковая съемка

Рабочий диаметр съемки в исходном положении определяется по формуле

$$d = d_{ni}^{\text{в}} + s_i^{\text{в}},$$

где $d_{ni}^{\text{в}}$ – диаметр пуансона в верхнем расчетном сечении, мм; $s_i^{\text{в}}$ – толщина стенки полуфабриката у обреза, мм.

Угол приемного конуса α определяется по формуле

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}=\frac{2\left(d_{\text{м}i}-d\right)}{h},$$

где $d_{\text{м}i}$ – диаметр нижней матрицы, мм; h – высота рабочего сектора (3…6 мм).

Края секторов должны быть несколько развалены и закруглены по радиусу 1,0…1,5 мм.

Расточка в корпусе съемки учитывает величину расхода секторов при вхождении полуфабриката.

Ход сектора

$$\alpha=\frac{d_{\text{м}i}-d}{2}+1{,}5\,.$$

Диаметр расточки в корпусе равен:

$$d_{\text{р}}=d_{\text{с}}+(1\div 2)\alpha,$$

где $d_{\text{с}}$ – наружный диаметр съемки, выбираемый из конструктивных соображений.

Наружный диаметр корпуса съемки следует брать равным наружному диаметру сверточной или вытяжной матрицы.

Схема установки и крепления рабочего инструмента в инструментальном штамповом блоке АРЛ показана на рис. 8.67.

Высота конусной части корпуса съемки (двухсекторной), учитывающая расход секторов, определяется из выражения

$$h=h_3+\frac{R-r}{\operatorname{tg}\beta}+2\text{ мм},$$

где h_3 – высота конусной части сектора, мм; R – радиус полуфабриката $d_i/2$, мм; r – радиус рабочей части сектора, мм; β – угол наружного конуса съемки.

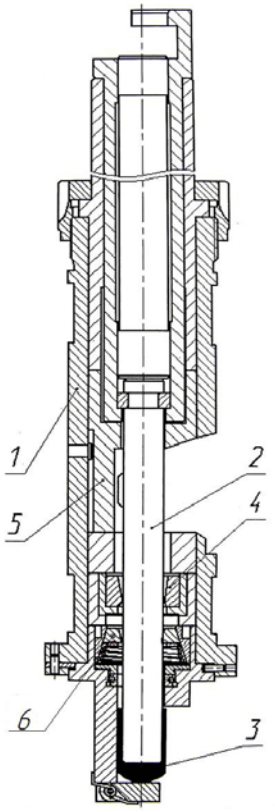


Рис. 8.67. Схема установки вытяжного инструмента в инструментальном блоке АРЛ: *1* – корпус блока вытяжки; *2* – пуансон; *3* – заготовка; *4* – матрица; *5* – приемник; *6* – съемник

8.8.9. Расчет технологических усилий

В процессах вытяжки с утонением различают два основных случая воздействия деформирующего усилия на заготовку:

1) при непосредственном контакте давящего подвижного инструмента (пуансона) и пластически деформируемой части заготовки в зоне очага деформа-

ции – в зоне дна на первой начальной стадии процесса, характерном для процессов объемной штамповки;

2) через промежуточный упругодеформируемый "жесткий" участок сформированной стенки заготовки на 3-й, стационарной, стадии процесса, характерный для процессов листовой штамповки.

При вытяжке с утонением через одну матрицу толстодонных заготовок ($S_{i-1}^{д}/d_{i-1} \geq 0{,}2$) максимальное усилие $P_{\max}$ соответствует первой стадии и определяется по формуле

$$P_{\max} = P_{1i} = q_{1i} \cdot F_{пi}^{н}, \tag{8.138}$$

где P_{1i} – усилие на первой стадии процесса i-й вытяжки; q_{1i} – удельное усилие на первой стадии процесса i-й вытяжки; $F_{пi}^{н}$ – площадь нижнего поперечного расчетного сечения пуансона.

Удельное усилие расчитывается по формуле

$$q_{1i} = \frac{\sqrt{3}}{2}\sigma_{iср}^{д} \cdot \varepsilon_{iср}^{д}\left[2{,}2(2\cos\alpha - 1)^2 + \frac{f}{2\sin\alpha}\right], \tag{8.139}$$

где $\varepsilon_{iср}^{д} = \frac{2}{\sqrt{3}}\ln\frac{d_{i-1}}{d_i}$; $\sigma_{iср}^{д} = f\left(\varepsilon_{iср}^{д}\right)$ (определяется по аналитической аппроксимации диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ для материала заготовки), α – односторонний угол конусности, град; f – коэффициент трения.

Усилие вытяжки на стационарной стадии процесса

$$P_{зi} = \sigma_{zi} \cdot F_i, \tag{8.140}$$

где σ_{zi} – растягивающее напряжение в стенке заготовки на i-й вытяжке; F_i – площадь опасного поперечного сечения заготовки на i-й вытяжке (обычно принимается по верхнему расчетному сечению, в котором степень деформации $e_{ii}^{в}$ наибольшая).

Усилие вытяжки через одну матрицу на стационарной стадии определяется по формуле

$$P_{зi} = \frac{\pi}{4}\frac{(d_{мi}^2 - d_{пi}^2)}{\sin^2\alpha_i}\left\{0{,}55\sigma_i^{в}(\cos 2\theta_{ср} - \cos 2\alpha_i) \times \right.$$
$$\left. \times\left[\ln\frac{1}{(1-\psi_i^{в})} + \frac{d_{пi}B_i}{(D_0^2 - d_{пi}^2)(1-\psi_i^{в})}\right] + \ln\frac{1}{(1-\psi_i^{в})}\tau_{м}\sin\alpha_i\right\}, \tag{8.141}$$

где $d_{мi}$, $d_{пi}$ – диаметры матрицы и пуансона (в верхнем расчетном сечении); α_i – угол конусности матрицы; $\sigma_i = f\left(e_{iср}^{в}\right)$ (определяется по аналитической

аппроксимации диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ для материала заготовки); ψ_i – относительное сужение площади поперечного, верхнего, сечения ($\psi_i = 1 - F_i^{\text{в}} \big/ F_{i-1}^{\text{в}}$); $\tau_{\text{м}} = f_{\text{м}} \sigma_i^{\text{в}}$; f – коэффициент трения на поверхности контакта заготовки с матрицей;

$$\theta_{\text{ср}} \cong \frac{1}{2}\left[\operatorname{arctg} \frac{\left(R_{i-1} - S_i^{\text{в}}\right)}{R_{i-1} \operatorname{ctg} \alpha_i} + \operatorname{arctg} \frac{\left(R_i - S_i^{\text{в}}\right)}{R_i \operatorname{ctg} \alpha_i} \right]; \; e_{i\text{ср}}^{\text{в}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \ln \frac{F_{i-1}^{\text{в}}}{F_i^{\text{в}}};$$

$$B_i \cong \frac{[1 - (R_i / R_{i-1})^2]}{[1 - (R_i - S_i \cos \alpha_i)^2 / R_{i-1}^2]}; \; R_i = \frac{d_i}{2}; \qquad R_{i-1} = \frac{d_{i-1}}{2}.$$

При последовательной вытяжке через две матрицы усилие вытяжки определяется для каждой матрицы в отдельности по формулам (8.138)–(8.141), но с учетом предварительного упрочнения материала заготовки в верхней матрице при расчете усилия вытяжки в нижней матрице, т.е.

$$\sigma_{i\text{н}}^{\text{в}} = f\left(e_{i\Sigma}^{\text{в}}\right), \tag{8.142}$$

где $\sigma_{i\text{н}}^{\text{в}}$ – интенсивность напряжений в верхнем расчетном сечении при деформировании в нижней матрице (определяется по аналитической аппроксимации диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$; $e_{i\Sigma}^{\text{в}} = e_{i\text{в}}^{\text{в}} + e_{i\text{н}}^{\text{в}}$ – суммарная деформация; $e_{i\text{в}}^{\text{в}}$, $e_{i\text{н}}^{\text{в}}$ – степени деформации после протягивания через верхнюю и нижнюю матрицы в отдельности).

При одновременной вытяжке через две матрицы приближенную оценку максимального усилия во время второго периода вытяжки можно определить как сумму двух составляющих:

$$P_{\Sigma} = P_{3\text{в}i} + P_{1\text{н}i}, \tag{8.143}$$

где $P_{3\text{в}i}$ – усилие на 3-й, стационарной, стадии вытяжки через верхнюю матрицу (по формуле (8.141)); $P_{1\text{н}i}$ – усилие на первой, нестационарной, стадии вытяжки через одну, нижнюю, матрицу (по формулам (8.138), (8.139)).

Величина усилия снятия заготовки с пуансона приближенно оценивается по формуле

$$P_{ci} = \pi K_1 K_2 \sigma_{i\text{ср}} S_i^{\text{в}} \left(H_i - S_i^{\text{д}}\right) f_{\text{п}}, \tag{8.144}$$

где $K_1 = 0{,}5 \ldots 0{,}8$; $K_1 = 0{,}8 \ldots 0{,}9$ – коэффициенты, учитывающие влияние температуры нагрева заготовки в результате теплового эффекта при пластической деформации и упругой разгрузке; $f_{\text{п}}$ – коэффициент трения на поверхности контакта заготоки и пуансона; H_i – полная высота протянутой заготовки; $S_i^{\text{д}}$ – толщина дна заготовки; $\sigma_{i\text{ср}} = (\sigma_i^{\text{в}} + \sigma_i^{\text{н}}) \big/ 2$; $\sigma_i^{\text{в}}$, $\sigma_i^{\text{н}}$ –

интенсивность напряжений в верхнем и нижнем расчетных сечениях (определяются по аналитическим аппроксимациям диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ для материала заготовки, т.е. $\sigma_i^{\text{в}} = f\left(\varepsilon_i^{\text{в}}\right)$, $\sigma_i^{\text{н}} = f\left(\varepsilon_i^{\text{н}}\right)$).

В некоторых случаях целесообразно выполнить проверку на прочность пуансонов на продольный изгиб по условию

$$P_{1\max} \le [P], \tag{8.145}$$

где $[P] = P_{\text{кр}} / K_{\text{у}}$; $P_{1\max}$ – максимальное усилие (на 1-й стадии процесса); $P_{\text{кр}}$ – критическое усилие; $K_{\text{у}}$ – коэффициент запаса устойчивости (для закаленной стали $K_{\text{у}} = 1{,}5 \ldots 3$).

Критическое усилие определяется по формуле

$$P_{\text{кр}} = \eta \frac{EJ}{l^2}, \tag{8.146}$$

где η – коэффициент, характеризующий условия закрепления пуансона, схему нагружения и вид продольного сечения (для случая жесткого закрепления пуансона в пуансонодержателе и нагружения в торец продольной силой можно принять $\eta = 2{,}467$); $J = \pi\left(d_{\text{п}i}^{\text{в}}\right)^4 / 64 \cong 0{,}05\left(d_{\text{п}i}^{\text{в}}\right)^4$ – осевой момент инерции; $d_{\text{п}i}^{\text{в}}$ – диаметр пуансона в верхнем расчетном сечении; $E = 2{,}1 \cdot 10^5 \ldots 2{,}2 \cdot 10^5$ МПа$\left(2{,}1 \ldots 2{,}2 \cdot 10^4 \text{ кгс}/\text{мм}^2\right)$ – модуль нормальной упругости; l – длина свободной, незакрепленной части пуансона. Допускаемая из условия прочности на продольный изгиб l должна удовлетворять условию

$$l \le \sqrt{\frac{\pi^2 EJ}{4K_{\text{у}} P_{1\max}}}. \tag{8.147}$$

8.9. Пример расчета технологических параметров процесса вытяжки с утонением

8.9.1. Исходные данные

К исходным данным относятся:

- чертеж детали (полуфабриката);
- технические требования, предъявляемые к детали по допускаемым отклонениям на размеры и механическим свойствам (твердость по Виккерсу в верхнем расчетном сечении $HV_{\text{э}}^{\text{в}} = 245$);
- принятый маршрутный технологический процесс (многооперационная свертка и вытяжка с утонением с промежуточными отжигами (см. подразд. 4.2));

- материал детали – ст.18ЮА (ГОСТ 809-81);
- механические свойства холоднокатаной листовой стали (толщиной 3,2 мм) (см. табл. 2.12);
- математические модели характеристик механических свойств в размерном ($\sigma_в$, HV, δ, σ_i) и безразмерном ($\sigma_в/\sigma_{в0}$, HV/HV_0) виде и графические зависимости (рис. 2.19…2.22, 2.27…2.29) (п. 2.4.1), учитывающие влияние технологических факторов (степени деформации e_i, режима термообработки T, τ).

8.9.2. Определение размеров и механических свойств конечной заготовки

Расчетными размерами являются:
- наружный диаметр d_n;
- толщина стенки S_n^j в расчетном сечении j (j – порядковый номер сечения);
- внутренние диаметры в расчетных сечениях d_n^j;
- радиусы сопряжения стенки и дна R_n, r_n;
- максимальная толщина дна $S_n^д$;
- расстояния выделенных расчетных сечений от внутренней поверхности дна h_n^j;
- полная высота заготовки $H_n^д$;

При отсутствии, последующей после вытяжки, механической обработки, кроме обрезки неровной кромки, все размеры, за исключением полной высоты, назначаем равными соответствующим размерам детали (в мм):

$S_n^в = 0{,}23$; $h_n^в = 33{,}71$;
$S_n^V = 0{,}23$; $h_n^V = 28{,}29$;
$S_n^c = 0{,}34$; $h_n^c = 25{,}34$;
$S_n^{IV} = 0{,}43$; $h_n^{IV} = 17{,}50$;
$S_n^{III} = 0{,}565$; $h_n^{III} = 10{,}76$;
$S_n^{II} = 0{,}74$; $h_n^{II} = 4{,}0$;
$S_n^н = 0{,}84$; $h_n^н = 2{,}0$.

Допускаемые отклонения в мм на толщину стенки в соответствующих сечениях; $\Delta S_n^в = -0{,}01$; $\Delta S_n^V = -0{,}01$; $\Delta S_n^c = -0{,}01$; $\Delta S_n^{IV} = -0{,}01$; $\Delta S_n^{III} = -0{,}01$; $\Delta S_n^{II} = -0{,}01$; $\Delta S_n^н = -0{,}01$.

Внутренние диаметры в расчетных сечениях определены как разность

$$D_n^j = d_n - 2S_n^j$$

и имеют следующие значения в мм: $d_n^в = 9{,}34$; $d_n^V = 9{,}34$; $d_n^c = 9{,}12$; $d_n^{IV} = 8{,}94$; $d_n^{III} = 8{,}67$; $d_n^{II} = 8{,}32$; $d_n^н = 8{,}12$.

Радиусы сопряжения внутренних поверхностей приняты: $R_n = R = 100$ мм; $r_n = r = 2$ мм. Максимальную толщину дна принимаем $S^д_{n\max} = 3{,}4$ мм, а высоту ее выпуклой сферической части $h_{сф} \approx 0{,}15\, d_n \approx 0{,}5$ мм.

Полную высоту конечной заготовки H_n определяем по высоте готовой детали H с учетом припуска на обрезку (см. табл. 8.15):

$\Delta H_{об} \approx 0{,}2\ H$ (рис. 8.68);

$H_n = H + \Delta H_{об} = 43{,}5 + 0{,}2 \cdot 43{,}5 \cong 52{,}5$ мм.

Требуемая твердость заготовки в верхнем расчетном сечении назначена равной твердости готовой детали в этом же сечении:

$$HV_n = HV_n = 245\,.$$

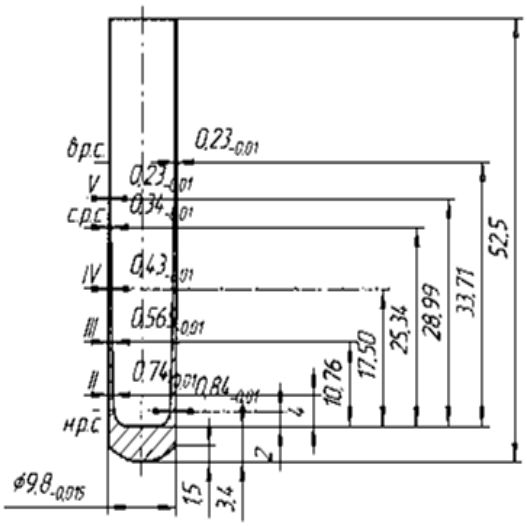


Рис. 8.68. Размеры конечной штампованной заготовки для вытяжки с утонением

8.9.3. Расчет размеров исходной сплошной заготовки (кружка) для вытяжки с утонением

Исходные данные:

- размеры конечной заготовки после последней операции вытяжки с утонением;
- вид заготовки и её заданный базовый размер;
- припуски на механическую обработку и обрезку заготовок после промежуточных вытяжек.

При применении плоской листовой заготовки в виде кружка рассчитываем D_0 по формуле

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot V_n}{\pi \cdot S_0 \cdot \eta_n}}\,,$$

где V_n – объём конечной заготовки; S_0 – толщина исходной заготовки; η_n – коэффициент использования металла, который назначают с учётом технологического маршрута, в зависимости от количества штамповочных операций и, соответственно, количества операций обрезок, припусков на механическую обработку, а также потерь металла на угар и травление при проведении термической и химической обработки заготовок (η_n =0,62);

$$V_n = V^{\text{в–V}} + V^{\text{V–с}} + V^{\text{с–IV}} + V^{\text{IV–III}} + V^{\text{III–II}} + V^{\text{II–н}} + V^{\text{кр–в}} + V^{\text{н–д}} + V^{\text{д}},$$

где V_n^j – объём j-го элемента,

$V^{\text{в–V}}$ =12,32 мм^3; $V^{\text{V–с}}$ =10,88 мм^3;

$V^{\text{с–IV}}$ =29,6 мм^3; $V^{\text{IV–III}}$ =32,16 мм^3;

$V^{\text{III–II}}$ =41,48 мм^3; $V^{\text{II–н}}$ = 44,69 мм^3;

$V^{\text{кр–в}}$ = 82,94 мм^3; $V^{\text{н–д}}$ = 89,13 мм^3;

$V^{\text{д}}$ = 245,33 мм^3.

Тогда

$$V_n = 12{,}32 + 10{,}88 + 29.6 + 32{,}16 + 41{,}48 + 44{,}69 + 82{,}94 + 89{,}13 + 245{,}33 =$$

$$= 588{,}53 \text{ мм}^3;$$

$$S_0 = C^{\text{д}}_{S_0} \cdot S^{\text{д}}_n = 0{,}73 \cdot 4{,}4 = 3{,}2 \text{ мм};$$

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot 588{,}53}{3{,}14 \cdot 3{,}2 \cdot 0{,}62}} = 19{,}5 \text{ мм}, \text{ где было принято } C^{\text{д}}_{S_0} = 0{,}73;\ \eta_n = 0{,}62.$$

8.9.4. Расчёт размеров исходной полой заготовки (после свёртки)

Исходная заготовка для вытяжки с утонением – полая заготовка, изготавливаемая способом комбинированной вытяжки (свёртки) из плоской заготовки (рис. 8.69).

При определении размеров полых заготовок в зависимости от размеров исходной плоской (D_0, S_0) и конечной штампованной ($d_n, S^{\text{д}}_n, S^j_n, S^{\text{н}}_n, h^{\text{н}}_n, h^{\text{д}}_n, h^{\text{в}}_n, H_n$) заготовки необходимо:

- определить базовые размеры;
- обеспечить технологичность конструкции с учетом применяемых способов её изготовления и последующей обработки;

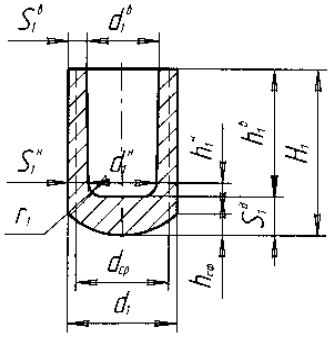


Рис. 8.69. Эскиз полой заготовки, полученной на свертке

• выявить не изменяемые при последующей обработке элементы (участки) исходной заготовки и их размеры.

За базовый размер заготовки принимаем толщину дна:

$$S_1^{д} = C_S \cdot S_0, \text{ где } C_S \le 1;$$

$$S_1^{д} = 1{,}0 \cdot 3{,}2 = 3{,}2 \text{ мм}.$$

Расчётные формулы и полученные значения приведены в табл. 8.25.

Таблица 8.25

Расчёт размеров исходной полой заготовки

Определяемая величина	Расчётная формула	Полученное значение, мм
1	2	3
Наружный диаметр заготовки, d_1	$d_1 = d_{ср1}^{в} + S_1^{в}$	$d_1 = 13{,}65 + 1{,}92 = 15{,}57$
Средний диаметр заготовки в верхнем расчётном сечении, $d_{ср1}^{в}$	$d_{ср1}^{в} = D_0 \cdot m_{d1}$	$d_{ср1}^{в} = 19{,}5 \cdot 0{,}70 = 13{,}65$
Коэффициент вытяжки, m_{d1}	Назначается по опытным данным (табл. 8.16, 8.17)	$m_{d1} = 0{,}70$
Толщина стенки в верхнем расчётном сечении, $S_1^{в}$	$S_1^{в} = S_0 \cdot m_{S_1}^{в}$	$S_1^{в} = 3{,}2 \cdot 0{,}6 = 1{,}92$ мм
Коэффициент утонения в верхнем расчётном сечении, $m_{S_1}^{в}$	$m_{S_1}^{в} > (m_{Si})_{пр}$	принимаем $m_{S_1}^{в} = 0{,}6$
Предельный коэффициент утонения, $(m_{S_i})_{пр}$	Рассчитывается по математической модели	$(m_{S_i})_{пр} = 0{,}44$
Относительное изменение площади поперечного сечения заготовки в верхнем расчетном сечении, $\psi_1^{в}$	$\psi_1^{в} = 1 - m_{d1} \cdot m_{S1}^{в}$	$\psi_1^{в} = 1 - 0{,}70 \cdot 0{,}60 = 0{,}58$
Внутренний диаметр заготовки в верхнем сечении, $d_1^{в}$	$d_1^{в} = d_{ср1}^{в} - S_1^{в}$	$d_1^{в} = 13{,}65 - 1{,}92 = 11{,}73$
Расстояние нижнего расчётного сечения от внутренней поверхности дна, $h_1^{н}$	$h_1^{H} = r_1 \cdot (1 - \sin\beta)$	$h_1^{н} = 3{,}2 \cdot (1 - \sin 1^\circ) \approx 3{,}2$
Радиус сопряжения внутренних поверхностей, r_1	$r_1 / S_0 = 0{,}8 \div 1{,}0$	$r_1 = 1{,}0 \cdot 3{,}2 = 3{,}2$
Угол конусности, β	$\beta = 0^\circ 30' \ldots 3^\circ$	$\beta = 1^\circ$
Расстояние верхнего расчётного сечения от внутренней поверхности дна, $h_1^{в}$	$h_1^{в} \approx h_1^{н} + \dfrac{(D_0^2 - d_1^2) S_0}{4 \cdot d_{ср}^{в} \cdot S_1^{в}}$	$h_1^{в} \approx 3{,}2 + \dfrac{(19{,}5^2 - 15{,}57^2) 3{,}2}{4 \cdot 13{,}65 \cdot 1{,}92} = 7{,}4$

Окончание табл. 8.25

1	2	3
Внутренний диаметр заготовки в нижнем расчётном сечении, $d_1^{\text{н}}$	$d_1^{\text{н}} = d_1^{\text{в}} - 2(h_1^{\text{в}} - h_1^{\text{н}})\text{tg}\beta_1$	$d_1^{\text{н}} = 11{,}73 - 2(7{,}4 - 3{,}2) \times$ $\times 0{,}0175 = 11{,}36$
Толщина стенки в нижнем расчётном сечении, $S_1^{\text{н}}$	$S_1^{\text{н}} = \dfrac{d_1 - d_1^{\text{н}}}{2}$; $H_1 = S_1^{\text{д}} + h_1^{\text{в}}$	$S_1^{\text{н}} = \dfrac{15{,}57 - 11{,}36}{2} = 2{,}1$; $H_1 = 3{,}2 + 7{,}4 = 10{,}6$
Толщина дна заготовки $S_1^{\text{д}}$	$S_1^{\text{д}} = C_S \cdot S_0$	$S_1^{\text{д}}$ =1,0·3,2=3,2 мм
Высота сферической части, $h_{\text{сф}}$	$h_{\text{сф}} \approx \dfrac{(d_1 + r_1)}{6}$	$h_{\text{сф}} \approx \dfrac{(15{,}57 + 3{,}2)}{6} = 3{,}13$
Радиус вытяжной кромки матрицы, $r_{\text{м1}}$	$r_{\text{м1}} = (0{,}75 \ldots 3{,}50) \cdot S_0$	$r_{\text{м1}} = 2 \cdot 3{,}2 = 6{,}4$

Оптимальное значение угла конусности матрицы определим по формуле

$$\alpha^{\circ}_{\text{опт}} = 23{,}6 - 16{,}65 \cdot m_d + 7{,}45 \cdot \frac{f_{\text{п}}}{f_{\text{м}}} - 6{,}75 \cdot n,$$

где принимаем $\dfrac{f_{\text{п}}}{f_{\text{м}}}$=1; n=0,3.

Тогда $\alpha^{\circ}_{\text{опт}} = 23{,}6 - 16{,}65 \cdot 0{,}55 + 7{,}45 \cdot 1 - 6{,}75 \cdot 0{,}3 = 20^{\circ}$.

Расчёт предельного коэффициента утонения при вытяжке (свёртке) через одну матрицу может выполняться по обобщённой многофакторной математической модели С.П. Яковлева:

$$(m_{si})_{\text{пр}} = (40{,}21 + 3{,}67 \cdot x_1 - 7{,}33 \cdot x_2 - 5{,}74x_3 - 3{,}5x_4 - 2{,}25x_5 + 0{,}34x_4 -$$
$$- 0{,}92x_1x_2 + +2{,}75x_1x_3 - 0{,}5x_1x_4 - 0{,}25x_1x_5 - 0{,}084x_1x_4 + 0{,}5x_2x_3 +$$
$$+ 1{,}5x_2x_5 + 0{,}42x_2x_4 - 0{,}33x_3x_4 + +0{,}42x_3x_4 + 0{,}17x_4x_5 + 0{,}83x_4x_6 -$$
$$- 0{,}42x_5x_6 - 0{,}92x_1^2 + 1{,}08x_2^2 + 0{,}49x_3^2 - 0{,}59x_6^2) \cdot 10^{-2},$$

где $x_1 = \dfrac{(\alpha - 15)^{\circ}}{5^{\circ}}$; $x_2 = \dfrac{(m_{d1} - 0{,}65)}{0{,}15}$; $x_3 = \dfrac{f_n}{f_{\text{м}}} - 2$; $f_{\text{м}} = 0{,}05$; $x_4 = \dfrac{(n - 0{,}3)}{0{,}2}$;

$x_5 = \dfrac{(R - 1)}{0{,}5}$; $x_6 = \dfrac{c}{0{,}5}$; α – односторонний угол конусности матрицы; $f_{\text{п}}, f_{\text{м}}$ – коэффициенты трения на контактных поверхностях пуансона и матрицы; n – показатель кривой упрочнения материала заготовки; R – средний

коэффициент анизотропии для плоского напряжённого состояния; c – характеристика анизотропии в условиях плоской деформации.

Приведённая выше формула получена в предположении изменения учтённых факторов в следующих диапазонах:

$$\alpha = 10^\circ \ldots 30^\circ; \quad m_{d1} = 0{,}5 \ldots 0{,}8; \quad n = 0{,}1 \ldots 0{,}5; \quad R = 0{,}5 \ldots 1{,}5; \quad c = -0{,}5 \ldots 0{,}5;$$

$$f_{\text{п}} = (1 \ldots 3) f_{\text{м}}.$$

Подставив численные значения параметров, получим

$$x_1 = \frac{(20-15)^\circ}{5^\circ} = 1; \qquad x_2 = \frac{(0{,}70-0{,}65)}{0{,}15} = 0{,}33; \quad x_3 = 1-2 = -1;$$

$$x_4 = \frac{(0{,}3-0{,}3)}{0{,}2} = 0; \qquad x_5 = \frac{(1-1)}{0{,}5} = 0; \qquad x_6 = \frac{0}{0{,}5} = 0.$$

$$(m_{Si})_{\text{пр}} = (40{,}21 + 3{,}67 \cdot 1 - 7{,}33 \cdot 0{,}33 - 5{,}74 \cdot (-1) - 3{,}5 \cdot 0 - 2{,}25 \cdot 0 + 0{,}34 \cdot 0 -$$

$$- 0{,}92 \cdot 1 \cdot 0{,}33 + 2{,}75 \cdot 1 \cdot (-1) - 0{,}5 \cdot 1 \cdot 0 - 0{,}25 \cdot 1 \cdot 0 - 0{,}084 \cdot 1 \cdot 0 + 0{,}5 \cdot 0{,}33 \cdot (-1) +$$

$$+ 1{,}5 \cdot 0{,}33 \cdot 0 + 0{,}42 \cdot 0{,}33 \cdot 0 - 0{,}33 \cdot (-1) \cdot 0 + 0{,}42 \cdot (-1) \cdot 0 + 0{,}17 \cdot 0 \cdot 0 + 0{,}83 \cdot 0 \cdot 0 -$$

$$- 0{,}42 \cdot 0 \cdot 0 - 0{,}92 \cdot 1^2 + 1{,}08 \cdot 0{,}33^2 + 0{,}49 \cdot (-1)^2 - 0{,}59 \cdot 0^2) \cdot 10^{-2} = 0{,}44.$$

8.9.5. Расчёт количества вытяжных операций

Исходные данные:

- размеры конечной заготовки ($d_n^j, S_n^j, h_n^j, r_n^j, S_n^{\text{д}}, H_n$)(см. рис. 8.68);
- механические свойства конечной заготовки в расчётных сечениях ($HV_n^{\text{â}} = 245$);
- количество расчётных сечений (K=7);
- маршрутный технологический процесс изготовления конечной заготовки вытяжкой;
- способ штамповки исходной полой для вытяжки заготовки (свертка);
- математические модели характеристик механических свойств материала детали;
- математические модели предельной деформации при вытяжке с утонением ($e_{i\text{пр}}$);
- размеры исходной для вытяжки полой заготовки $d_1^j, S_1^j, h_1^j, r_1^j, S_1^{\text{д}}, H_1$;
- размеры исходной сплошной заготовки (D_0, S_0).

Общее количество операций вытяжки определим по формуле $n = n_{\text{упр}} + n_{\text{ф}}$, где $n_{\text{упр}}$ – количество упрочняющих операций, необходимых

для обеспечения заданных размеров и твердости $HV_n^{\text{â}} = 245$; $n_{\text{ф}}$ – количество формоизменяющих операций.

Расчёт количества упрочняющих операций ($n_{\text{упр}}$). Алгоритм расчёта дан в п.п. 8.8.4 (рис. 8.45, 8.46).

Примем следующее допущение: перед упрочняющими операциями материал заготовки находится в исходном отожжённом состоянии, т.е. в любом сечении j

$$HV^{j} = HV_0 = 126.$$

Тогда в качестве моделей может быть принята аналитическая (п. 2.4.1) зависимость твердости от степени деформации на упрочняющих операциях:

$$HV^{\text{в}} = 245 = 126 + 173{,}3e_i - 63{,}4e_i^2,$$

откуда

$$e_{i\text{упр}} = f\left(\frac{HV_{\max}}{HV_0}\right),$$

$$e_{i\text{упр}} = 1{,}4.$$

Оценим возможность упрочнения материала заготовки до заданного уровня за один переход ($N_n = 1$). За переход принимается вытяжка через одну матрицу. Модель коэффициента использования ресурса пластичности на упрочняющих операциях $\omega_{i_{\text{упр}}}^{j}$ выбираем с учётом принятых технологического маршрута и следующих допущений:

1) каждый из переходов вытяжки в отдельности рассматривается как дискретно выполняемый акт приближенно монотонной пластической деформации, осуществляемый при $\nu_\sigma = \text{const}$ и $K = \text{const}$;

2) процесс пластической деформации в целом при последовательной вытяжке за несколько переходов не является монотонным ($\nu_\sigma = \text{var}$ и $K = \text{var}$);

3) интенсивность пластического разрыхления (повреждённость) металла заготовки равна нулю в начале каждого этапа, а характер её увеличения с ростом степени деформации $a^{j} = f\left(e_{ii}^{j}\right)$ не зависит от номера перехода;

4) введение термообработки полностью или частично залечивает субмикро- и микродефекты и полностью или частично устраняет повреждённость металла;

5) химическая обработка и смазка поверхности заготовки не влияют на ω_i.

Для одноперехoдного одноoперационного процесса принимаем модель коэффициента использования ресурса пластичности (8.94):

$$\omega_{i_{\text{óïð}}}^{j} = \left(\frac{e_{i_{\text{óïð}}}^{j}}{e_{i\text{p}}^{j}} \right)^{\grave{a}},$$

где a – коэффициент, учитывающий влияние свойств материала коэффициента жёсткости схемы напряжённого состояния на интенсивность повреждаемости металла заготовки (8.99); $e_{i\text{p}}^{j}$ – предельная до разрушения степень деформации в j-м расчетном сечении (определяем по математической модели, представленной в подразд. 8.5).

Математическая модель предельной до разрушения степени деформации при вытяжке с утонением через одну матрицу имеет вид

$$e_{i\text{p}}^{j} = 97 + 1{,}65e_{i0} - 2{,}47\alpha - 3{,}25\beta + 0{,}016e_{i0}\alpha - 0{,}028e_{i0}^{2} + 0{,}023\alpha^{2} + 3S_0,$$

где принимаем $e_{i0} = 0\%$; S_0=1,92 мм – толщина стенки в в.р.с. исходной полой заготовки после первой вытяжки–свёртки ($S_1^{\text{в}}$, табл. 8.25), $\alpha = 8^{\circ}, \beta = 1^{\circ}$.

Интервалы варьирования технологических факторов для этой математической модели:

$$e_{i0} = 0...50\%; \quad \alpha = 5...25^{\circ}, \quad \beta = 0{,}5...1^{\circ};$$

$$e_{i\text{p}} = 97 - 2{,}47 \cdot 8 - 3{,}25 \cdot 1 + 0{,}023 \cdot 8^{2} + 3 \cdot 1{,}92 = 81\%,$$

или, в относительных безразмерных величинах, $e_{i\text{p}}$=0,81.

Принимая во внимание, что $\dfrac{e_{i_{\text{óïð}}}^{\hat{a}}}{e_{i\text{p}}} = \dfrac{1{,}4}{0{,}81} = 1{,}73 > 1{,}0,$ коэффициент $a > 2{,}0$ при $a_0 \cong 2{,}8$ и $K \le 1{,}0$ и $\omega_{i_{\text{упр}}}^{\text{в}} > 1$ (при $\omega_{i_{\text{упр}}}^{\text{в}} = 1$ наступает макроразрушение), назначаем без промежуточных расчётов четырехпереходный процесс без промежуточных отжигов. Этот процесс может быть реализован за две вытяжные операции, каждая из которых выполняется по схеме одновременной вытяжки через две матрицы.

Принимаем следующее распределение степеней деформации в верхнем расчётном сечении по переходам: $e_{i1}^{\text{в}} = 0{,}40$, $e_{i2}^{\text{в}} = 0{,}38$, $e_{i3}^{\text{в}} = 0{,}37$, $e_{i4}^{\text{в}} = 0{,}25$. Это распределение удовлетворяет условию

$$e_{i1} \ge e_{i2} \ge e_{i3} \ge e_{i4}.$$

На последней, n-й, упрочняющей операции $e_{in\Sigma}^{\text{в}} = e_{i3}^{\text{в}} + e_{i4}^{\text{в}}$, на предпоследней операции $e_{i(n-1)\Sigma}^{\text{в}} = e_{i1}^{\text{в}} + e_{i2}^{\text{в}}$.

В соответствии с рекомендациями подразд. 8.5 выбраны значения коэффициентов вытяжки: $m_{d1}: m_{d1} = 0{,}95;\ m_{d2} = 0{,}96;\ m_{d3} = 0{,}965;\ m_{d4} = 0{,}995$ (удовлетворяет условию $m_{d1} \ge m_{d2} \ge m_{d3} \ge m_{d4}$).

По формулам (8.115) и (8.116) рассчитаны по переходам значения относительного сужения ψ_i и коэффициента утонения стенки m_{si} (табл. 8.26).

Оценка возможности реализации четырехпереходного процесса выполнена по условию прочности заготовки (8.109 и 8.110б):

$$\omega^j_{i_{\text{óïð}}} = \left\langle \left\{ \left[\left(\frac{e^j_{i1}}{e^j_{\text{ip}1}\left(K_1^j\right)} \right)^{\frac{a_1^j}{a_2^j}} + \frac{e^j_{i2}}{e^j_{\text{ip}2}\left(K_2^j\right)} \right]^{\frac{a_2^j}{a_3^j}} + \frac{e^j_{i3}}{e^j_{\text{ip}3}\left(K_3^j\right)} \right\}^{\frac{a_3^j}{a_4^j}} + \frac{e^j_{i4}}{e^j_{\text{ip}4}\left(K_4^j\right)} \right\rangle^{a_4^j} < 0{,}65 .$$

На первом переходе предельную до разрушения деформацию приняли в соответствии с рассчитанным по модели для одной матрицы значением, т.е.

$$e_{\text{ip}1}\left(K_1^j\right) = 0{,}81 .$$

Для каждого последующего перехода значение предельной деформации $e_{\text{ip}i}$ определяли по формуле (8.100): $e_{\text{ip}i} = e_{\text{ip}1}^{a_i}(e_{i+1})^{1-a_i}$.

Коэффициент a_i^j на любом i-м переходе определяется как функция от схемы напряжённого состояния $\left(K_1^j\right)$ на этом переходе по формуле

$$a_i^j = a_0^{1+0{,}14\cdot K_j} = 2{,}8^{1+0{,}14\cdot K_j},$$

где a_0 – значения коэффициента при K=0 – характеристика материала.

Принимаем a_0=2,80. Оценку коэффициента жёсткости выполним по соотношению (8.102):

$$K_i = 1{,}73\cdot\left(2\cdot\ln\frac{1}{m_S} + 5 - 6\sqrt{m_{di}}\right).$$

Рассчитанные значения параметров приведены в табл. 8.26.

Таблица 8.26

Расчётные значения параметров деформации в верхнем расчётном сечении на упрочняющих операциях

Параметр	Номер перехода				Накопленная деформация	
	1	2	3	4	на n–1-й операции	на n-й операции
Степень деформации $e_i^{\text{в}}$	0,40	0,38	0,37	0,25	0,78	0,62
Относительное изменение площади поперечного сечения ψ_i	0,292	0,280	0,274	0,194	0,49	0,415
Коэффициент утонения стенки m_{si}	0,745	0,750	0,752	0,810	0,559	0,609
Коэффициент вытяжки m_{di}	0,950	0,960	0,965	0,995	0,912	0,960
Коэффициент напряжённого состояния K_i	-0,45	-0,52	-0,56	-0,97	-	-
Коэффициент a_i^j	2,62	2,60	2,58	2,43	-	-
Предельная до разрушения деформация e_{ipi}	0,81	2,72	2,80	4,36	-	-

Рассчитанные размеры заготовки после первой упрочняющей операции сравнивают с размерами исходной полой заготовки (заготовки после свертки) по условию

$$d_{1\text{упр}} \geq d_1 \;\; ; \;\; S^{\text{в}}{}_{1\text{упр}} \geq S_1^{\text{в}}.$$

Если это условие выполняется, то общее количество вытяжных операций будет равно количеству упрочняющих операций, т.е.

$$n = n_{\text{упр}}.$$

В этом случае “неупрочняющих” операций нет. При этом производится корректировка степени деформации и её составляющих в связи с необходимостью выравнивания:

$$d_{1\text{упр}} = d_1 \;\; ; \;\; S^{\text{в}}{}_{1\text{упр}} = S_1^{\text{в}}.$$

Корректировка размеров заготовок на упрочняющих операциях производится по табл. 8.26 в соответствии с новым значениями степеней деформации и может быть заменена на корректировку размеров заготовки после первой вытяжки. Тогда на упрочняющих операциях сохраняются рассчитанные размеры, а на свертке (подразд. 8.90) их принимают равными размерам заготов-

ки на первой упрочняющей операции (n-й или (n–1)-й и т.д.) и решают обратную задачу по определению степени деформации e_{ii}^{j} и её составляющих $m_{si}^{j}, m_{di}^{j}, \psi_1^{j}$.

Если это условие не выполняется, то общее количество операций складывается из суммы упрочняющих $n_{\text{упр}}$ и неупрочняющих $n_{\text{ф}}$ вытяжных операций:

$$n = n_{\text{упр}} + n_{\text{ф}}.$$

Из табл. 8.25 следует, что d_1=15,57 мм, $S_1^{\text{в}}$=1,92 мм. Наружный диаметр заготовки после n–1-й упрочняющей вытяжки будет равен:

$$d_{n-1} = \frac{d_{n\text{ср}}}{m_{dn}} + S_{n-1}^{\text{в}} = \frac{9{,}57}{0{,}96} + 0{,}38 = 10{,}35,$$

где $S_{n-1}^{\text{в}} = \dfrac{S_n^{\text{в}}}{m_{sn}} = \dfrac{0{,}23}{0{,}609} = 0{,}38.$

Проверяем условие:

$$10{,}35 > 15{,}57;$$

$$0{,}38 > 1{,}92.$$

Условие не выполняется, следовательно, $n = n_{\text{упр}} + n_{\text{ф}}$.

Расчёт количества неупрочняющих (формоизменяющих) операций. Алгоритм расчета в основном соответствует рассмотренному выше и отличается отсутствием выбора модели формирования механических свойств (рис. 8.46).

Этот алгоритм может быть представлен следующей последовательностью выполнения расчётных процедур:

1. Ввести исходные данные: размеры исходной плоской заготовки D_0, S_0; размеры заготовки после последней упрочняющей операции $d_{n\text{упр}}^{j}, S_{n\text{упр}}^{j}, h_{n\text{упр}}^{j}$.

2. Рассчитать общую деформацию, обеспечивающую формообразование конечной заготовки по следующим формулам:

$$e_{i\Sigma}^{j} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{F_0}{F_n^{j}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{1}{\left(1 - \psi_{\Sigma}^{j}\right)};$$

$$\psi_{\Sigma}^{j} = \frac{\left(F_0 - F_n^{j}\right)}{F_0} = 1 - m_{d\Sigma}^{j} \cdot m_{s\Sigma}^{j};$$

$$m_{d\Sigma}^{k}=\frac{d_n^{j}}{D_0};\quad m_{s\Sigma}^{k}=\frac{S_n^{j}}{S_0}\ ,$$

где $F_0, F_{n\text{упр}}^{j}$ – площади поперечного сечения исходной и конечной заготовки.

3. Назначить количество неупрочняющих (формоизменяющих) переходов $n_\text{ф}$ и операций.

4. Выбрать способ вытяжки: количество матриц, схему вытяжки (последовательную или одновременную), степень деформации в верхней матрице $e_{i\text{в}}^{j}$, углы конусности матрицы α_i и пуансона β_i.

5. Рассчитать коэффициент использования ресурса пластичности на неупрочняющей (формоизменяющей) операции.

6. Назначить допустимое значение коэффициента использования ресурса пластичности на неупрочняющих (формоизменяющих) операциях $\left[\omega_{i\text{ф}}^{j}\right]$.

7. Проверить условие прочности $\omega_{i\text{ф}}^{j}<\left[\omega_{i\text{ф}}^{j}\right]$.

8. Если условие выполняется, то принимаем $n_\text{ф}=n_\text{ф}$.

9. Если условие не выполняется, то назначаем $n_\text{ф}=n_\text{ф}+1$ и далее по алгоритму расчёта количества упрочняющих операций.

В соответствии с этим алгоритмом рассчитываем количество неупрочняющих (формоизменяющих) операций.

1. Исходные данные:

$$D_0=19{,}5\text{ мм};\ S_0=3{,}2\text{ мм};\ d_n=9{,}8\text{ мм};\ S_n^{\text{в}}=0{,}23\text{ мм};$$

$$d_n^{\text{в}}=9{,}34\text{ мм};\quad F_0^{\text{в}}=196\text{ мм}^2;\ F_n^{\text{в}}=6{,}91\text{ мм}^2.$$

2. Расчет степеней деформации на неупрочняющих, формоизменяющих, вытяжных операциях:

$$e_{i\Sigma}^{\text{в}}=\frac{2}{\sqrt{3}}\ln\frac{F_0^{\text{в}}}{F_n^{\text{в}}}=\frac{2}{\sqrt{3}}\ln\frac{196}{6{,}91}=3{,}96$$

– суммарная, накопленная деформация в верхнем расчетном сечении заготовки.

$$e_{i\text{ф}\Sigma}^{\text{в}}=e_{i\Sigma}^{\text{в}}-e_{i\Sigma\text{упр}}^{\text{в}}-e_{i\Sigma\text{св}}^{\text{в}}=3{,}86-1{,}4-1{,}28=1{,}18,$$

где $e_{i\Sigma\text{упр}}^{\text{в}}=1{,}4$ – степень деформации на упрочняющих операциях, требуемая для формирования механических свойств материала заготовки в верхнем расчетном сечении.

При свертке через одну матрицу (1-й переход)

$$e^{\text{в}}_{i\text{св}} \cong \frac{2}{\sqrt{3}}\ln\frac{F^{\text{в}}_0}{F^{\text{в}}_{\text{св}}} = \frac{2}{\sqrt{3}}\ln\frac{1}{m^{\text{в}}_{S\text{св}}m_{d\text{св}}} = \frac{2}{\sqrt{3}}\ln\frac{1}{0{,}6\cdot 0{,}55} = 1{,}28\,.$$

$$e^{\text{в}}_{i\text{св}} = 1{,}28 < (e^{\text{в}}_{i\Sigma\text{св}})_{\text{пр}} = \frac{2}{\sqrt{3}}\ln\frac{1}{m^{\text{в}}_{\text{спр}}\cdot m_d} = \frac{2}{\sqrt{3}}\frac{1}{0{,}44\cdot 0{,}55} = 1{,}63$$

– условие прочности выполняется.

3. Назначаем после свертки три вытяжных перехода $n_{\text{ф}}$ =3, выполняемых за две операции: первая вытяжка с утонением через одну матрицу (2-й переход) и вторая через две матрицы (3- и 4-й переходы). Принимаем следующие распределение степеней деформации в верхнем расчетном сечении по переходам: $e^{\hat{\text{a}}}_{i1} = 0{,}50$ (2-й переход); $e^{\hat{\text{a}}}_{i2\hat{\text{a}}} = 0{,}40$ (3-й переход); $e^{\hat{\text{a}}}_{i2\acute{\text{i}}} = 0{,}28$ (4-й переход), где $e^{\text{в}}_{i1}, e^{\text{в}}_{i2\text{в}}, e^{\text{в}}_{i2\text{н}}$ – степени деформации на первой и второй вытяжках через одну и две матрицы (верхнюю «2В» и нижнюю «2Н» соответственно).

4. Выбор способов вытяжки: на первой операции – вытяжка с утонением через одну матрицу с односторонним углом конусности α = 7°30′ пуансоном с односторонним углом конусности $\beta_{\text{п}}$ = 1°. На второй операции – вытяжка с утонением через две матрицы с одинаковыми углами конусности $\alpha_{1\text{в}} = \alpha_{2\text{н}}$ = 7°30′, пуансонами с углами конусности $\beta_{1\text{п}} = \beta_{2\text{п}}$ = 1°; по схеме одновременной вытяжки.

5. Расчет коэффициентов использования ресурса пластичности материалов деформированной заготовки по формулам (8.94), (8.95):

$$\omega^{\hat{\text{a}}}_{i1} = \left(\frac{e^{\hat{\text{a}}}_{i1}}{e_{ip1}}\right)^{\dot{a}_1} = \left(\frac{0{,}5}{1{,}10}\right)^{2{,}8} = 0{,}11,$$

где e_{ip1} рассчитывается по формуле (8.44) для случая вытяжки через одну матрицу ($e_{i0} = 1{,}28$; $\alpha_{\text{м}1}$ = 7°30′ ; $\beta_{\text{п}}$ = 1°; S_0 = 3,2 мм);

$\alpha_1 = \alpha_0^{1+0{,}14\hat{E}_1} = 2{,}8^{1+0{,}14\cdot 0{,}03} = 2{,}8$ – характеристика материала;

$K_1 = \frac{2}{\sqrt{3}}\left[2\ln\frac{1}{m^{B}_{S1}} + 5 - 6\sqrt{m_{\alpha 1}}\right] = \frac{2}{\sqrt{3}}\left[2\ln\frac{1}{0{,}74} + 5 - 6\sqrt{0{,}88}\right] = 0{,}03$ – коэффициент жесткости схемы напряженного состояния в зоне ОПД;

$$\omega^{\text{в}}_{i2} = \left[\left(\frac{e^{\text{в}}_{i2\text{в}}}{e_{ip1}}\right)^{a_1/a_2} + \left(\frac{e^{\text{в}}_{i2\text{н}}}{e_{ip2}}\right)\right]^{a_2} = \left[\left(\frac{0{,}40}{1{,}19}\right)^{1{,}04} + \left(\frac{0{,}28}{1{,}64}\right)\right]^{2{,}58} = 0{,}16,$$

где $e^{в}_{i2в}, e^{в}_{i2н}$ – степени деформации в верхнем расчетном сечении заготовки при протягивании через верхнюю и нижнюю матрицы соответственно; на второй вытяжке;

$$\alpha_1 = \alpha_0^{1+0,14K_{2в}} = 2,8^{1-0,14\cdot 0,32} = 2,69;$$

$$\alpha_2 = \alpha_0^{1+0,14K_{2н}} = 2,8^{1-0,14\cdot 0,54} = 2,58;$$

$$K_{2в} = \frac{2}{\sqrt{3}}\left[2\ln\frac{1}{0,75} + 5 - 6\sqrt{0,95}\right] = -0,32;$$

$$\hat{E}_{2í} = \frac{2}{\sqrt{3}}\left[2\ln\frac{1}{0,54} + 5 - 6\sqrt{0,96}\right] = -0,54.$$

6. Выбор допустимого коэффициента использования ресурса пластичности:

$$[\omega_{i2}] = 0,25.$$

7. Проверка условия прочности материала заготовки:

$$\omega^{в}_{i2} = 0,11 < 0,25;$$

$$\omega^{в}_{i4} = 0,16 < 0,25.$$

Условия прочности выполняются, количество операций и переходов не изменяется. Расчетные значения параметров даны в табл. 8.27.

Т а б л и ц а 8.27

Расчётные значения параметров деформации

Параметр	Номер перехода				Значения параметров	
	Свёртка, 1-я вытяжка		2-я вытяжка			
	1 (свёртка)	2 (1-я вытяжка)	3	4	на первой операции	на второй операции
Степень деформации $e^{в}_i$	1,28	0,50	0,40	0,28	1,78	0,68
Относительное изменение площади поперечного сечения $\psi^{в}_i$	0,67	0,35	0,29	0,22	0,84	0,45
Коэффициент утонения стенки $m^{в}_{Si}$	0,60	0,74	0,75	0,81	0,44	0,61
Коэффициент вытяжки $m^{в}_{di}$	0,70	0,877	0,95	0,96	0,61	0,91
Коэффициент жёсткости схемы напряжённого состояния $K^{в}_i$	1,19	0,03	-0,32	-0,54	-	-
Коэффициент $a^{в}_i$	3,1	2,80	2,69	2,58	-	-
Предельная до разрушения деформация e_{ip}	1,70	1,10	1,!9	1,64	-	-
Коэффициент использования ресурса пластичности $\omega^{в}_i$	0,42	0,11	-	0,16	-	-

8.9.6. Расчёт размеров заготовок после промежуточных вытяжек

Исходные данные:

- размеры заготовки после первой вытяжки: $d_1^j, S_1^j, h_1^j, r_1^j, S_1^д, H_1$;
- размеры заготовки после первой упрочняющей операции ((*n*–1)-й или (*n*–2)-й и т.д. вытяжек): $d_{n-1}^j, S_{n-1}^j, h_{n-1}^j, r_{n-1}^j, S_{n=1}^д, H_{n-1}$;
- количество промежуточных (формоизменяющих) операций $n_ф$ и значения показателей деформации по операциям в верхнем и нижнем расчётных сечениях $m_{Si}^j, m_{di}^{jj}, \psi_i^j, e_i^j$.

Расчётные размеры заготовки на любой *i*-й промежуточной операции (рис. 8.70) являются:

- диаметры $d_i, d_i^н, d_i^в$;
- толщины стенки в расчётных сечениях $S_i^н, S_i^в$;
- расстояния расчётных сечений от внутренней поверхности дна $h_i^н, h_i^в$;
- радиусы сопряжения стенки и дна r_i;
- полная высота заготовки H_i.

Последовательность расчётов и расчётные формулы приведены в табл. 8.28.

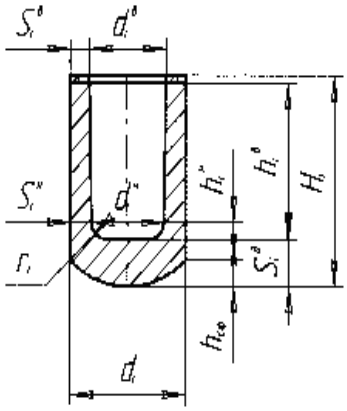


Рис. 8.70. Эскиз заготовки последней после промежуточной вытяжной операции

Таблица 8.28

Расчёт размеров заготовок на промежуточных вытяжках

Определяемая величина	Расчётная формула	Полученное значение, мм
1	2	3
Средний диаметр заготовки, $d_{iср}$	$d_{iср} = m_{di} \cdot d_{(i-1)ср}$	$d_{1ср} = 0{,}877 \cdot 13{,}65 = 12{,}0$; $d_{2ср} = 0{,}91 \cdot 12{,}0 = 10{,}90$
Коэффициент вытяжки, m_{di}		$m_{d1} = 0{,}877$; $m_{d2} = 0{,}91$
Толщина стенки заготовки в верхнем расчётном сечении, $S_i^в$	$S_i^в = S_{i-1}^в \cdot m_{Si}^в$	$S_1^в = 1{,}92 \cdot 0{,}74 = 1{,}42$; $S_2^в = 1{,}42 \cdot 0{,}61 = 0{,}87$

Продолжение табл. 8.28

1	2	3
Коэффициент утонения стенки в верхнем расчётном сечении, $m^{\text{в}}_{Si}$	$m^{\text{в}}_{S\Sigma} = m^{\text{в}}_{S\text{св}} \cdot m^{\text{в}}_{S1}$ $m^{\text{в}}_{S2} = m^{\text{в}}_{S2\text{в}} \cdot m^{\text{в}}_{S2\text{н}}$	$m^{\text{в}}_{S1}$ =0,44 (свёртка – 1-я вытяжка); $m^{\text{в}}_{S2}$ =0,61
Наружный диаметр заготовки, d_i	$d_i = d_{i\text{ср}} + S^{\text{в}}_i$	$d_1 = 12{,}0 + 1{,}42 = 13{,}42$; $d_2 = 10{,}90 + 0{,}87 = 11{,}77$
Толщина стенки заготовки в нижнем расчётном сечении, $S^{\text{н}}_i$	$S^{\text{н}}_i = S^{\text{н}}_{i-1} \cdot m^{\text{н}}_{Si}$	$S^{\text{н}}_1 = 2{,}11 \cdot 0{,}77 = 1{,}63$; $S^{\text{н}}_2 = 1{,}63 \cdot 0{,}65 = 1{,}06$
Коэффициент утонения стенки в нижнем расчётном сечении, $m^{\text{н}}_{Si}$	$m^{\text{н}}_{S\Sigma} = \dfrac{S^{\text{н}}_i}{S^{\text{н}}_{i-1}}$	$m^{\text{н}}_{S1}$ =0,51 (свёртка – 1-я вытяжка); $m^{\text{н}}_{S2}$ =0,65
Внутренний диаметр заготовки в нижнем расчётном сечении, $d^{\text{н}}_i$	$d^{\text{н}}_i = d_i - 2 \cdot S^{\text{н}}_i$	$d^{\text{н}}_1 = 13{,}42 - 2 \cdot 1{,}63 = 10{,}61$; $d^{\text{н}}_2 = 11{,}77 - 2 \cdot 1{,}06 = 9{,}65$
Внутренний диаметр заготовки в верхнем расчётном сечении, $d^{\text{в}}_i$	$d^{\text{в}}_i = d_i - 2 \cdot S^{\text{в}}_i$	$d^{\text{в}}_1 = 13{,}42 - 2 \cdot 1{,}42 = 10{,}58$; $d^{\text{в}}_2 = 11{,}77 - 2 \cdot 0{,}87 = 10{,}03$
Расстояние нижнего расчётного сечения от внутренней поверхности дна, $h^{\text{н}}_i$	$h^{\text{н}}_i = r_i \cdot (1 - \sin\beta_i)$	$h^{\text{í}}_1 = 2{,}8\left(1 - \sin 1^\circ\right) = 2{,}75$; $h^{\text{н}}_2 = 2{,}36$
Радиус сопряжения внутренних поверхностей стенки и дна, r_i	$r_i = r_{(i-1)} - \Delta r$; $\Delta r = \left(r_1 - r_n\right)/n - 1$	$r_1 = 3{,}2 - 0{,}4 = 2{,}8$; r_2 =2,4; Δr =(3,2-2,0)/(4-1)=0,4мм
Радиус сопряжения на первой вытяжке, r_1		r_1 =2,8
Радиус сопряжения на последней вытяжке, r_n		$r_n = 2{,}4$
Угол наклона образующей внутренней поверхности стенки заготовки к её оси β_i	$\beta_i = 0^\circ 15' \ldots 1^\circ 30'$	$\beta_1 = 1^\circ$
Расстояние нижнего сечения от внутренней поверхности дна на *i*-й операции, $h^{\text{в}}_i$	$h^{\text{â}}_i = h^{\text{í}}_i + \left(h^{\text{â}}_i - h^{\text{í}}_i\right) \cdot \tilde{N}_{hi}$	$h^{\text{в}}_1 = 2{,}75 + (14{,}59 - 2{,}36) \times$ $\times 0{,}72 = 11{,}56$; $h^{\text{в}}_2 = 2{,}36 + (26{,}2 - 1{,}25) \times$ $\times 0{,}49 = 14{,}59$
Коэффициент изменения высоты на *i*-й операции, C_{hi}	$C_{hi} = m_{Si} \cdot \dfrac{1 + C_{S(i+1)}}{1 + C_{Si}}$	$C_{h1} = 0{,}72$; C_{h2} =0,49

Окончание табл. 8.28

1	2	3
Коэффициент уменьшении толщины стенки заготовки при переходе от нижележащего к верхнележащему сечению	$C_{S(i+1)} = \frac{S_{i+1}^{в}}{S_{i+1}^{н}}$ $C_{Si} = \frac{S_i^{в}}{S_i^{н}}$	C_{S1}=0,45; C_{S2}=0,80; C_{S3}=0,87
Толщина дна заготовки, $S_i^{д}$	$S_i^{д} = S_{i-1}^{д}$	$S_1^{д}$=3,4; $S_2^{д}$=3,4
Высота заготовки, H_i	$H_i = S_i^{д} + h_i^{в} + \left(H_{i+1} - h_{i+1}^{в} - S_{i+1}^{д}\right) \times$ $\times\, m_{d(i+1)} \cdot m_{S(i+1)}$	H_2=3,4+14,59+(38,6-26,2- -3,4)·0,912·0,56=22,59; H_i=3,4+11,56+(22,59-14,59- -3,4)·0,61·0,91=17,51

В табл. 8.29 приведены размеры заготовок после проведения вытяжных операции (эскиз заготовки после промежуточной вытяжки – на рис. 8.70).

Т а б л и ц а 8.29

Размеры заготовок после проведения вытяжных операций

Размеры, мм	Формоизменяющие операции			Упрочняющие операции	
	Свёртка	1-я вытяжка с утонением	2-я вытяжка с утонением	3-я вытяжка с утонением	4-я вытяжка с утонением
$d_{i\text{ср}}$	13,65	12,0	10,90	9,97	9,57
$S_i^{в}$	1,92	1,42	0,87	0,38	0,23
d_i	15,57	13,42	11,77	10,73	9,80
$S_i^{н}$	2,11	1,63	1,06	0,94	0,84
$d_i^{н}$	11,36	10,16	9,65	9,03	8,12
$d_i^{в}$	11,73	10,58	10,03	10,15	9,34
$h_i^{н}$	3,2	2,75	2,36	1,25	2,0
r_i	3,2	2,8	2,4	2,10	2,0
$h_i^{в}$	7,4	11,56	14,59	26,2	33,71
$S_i^{д}$	3,2	3,4	3,4	3,4	3,4
H_i	10,6	17,5	22,6	38,6	52,5

8.9.7. Расчёт исполнительных размеров рабочего инструмента на вытяжных операциях

Исходные данные: размеры заготовкок на каждой из операций:

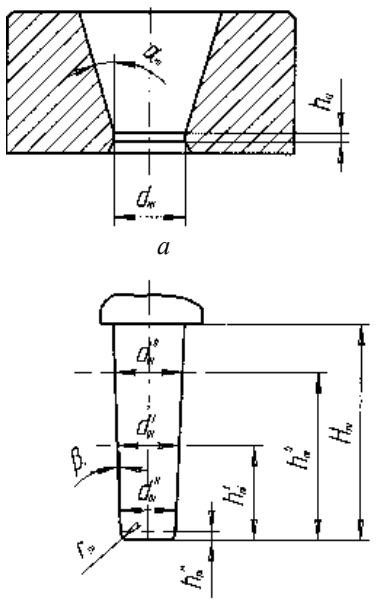


Рис. 8.71. Эскизы матрицы (*а*) и пуансона (*б*) для вытяжки с утонением

- $d_i^{\text{н}}, d_i^{j}, d_i^{\text{в}}, S_i^{\text{н}}, S_i^{\text{в}}, S_i^{j}, h_i^{\text{н}}, h_i^{\text{в}}, h_i^{j}, S^{\text{д}}, r_i, H_i$;
- допуски на неточность изготовления заготовок на каждой из операций: $T_{di}, T_{si}^{\text{н}}, T_{si}^{j}, T_{si}^{\text{в}}$;
- допуски на разностенность: $T_{\text{р}}^{\text{н}}, T_{\text{р}}^{j}, T_{\text{р}}^{\text{в}}$.

Расчётные исполнительные размеры рабочего инструмента на каждой операции (рис. 8.71):

- диаметр цилиндрического пояска матрицы $d_{\text{м}i}$;
- диаметры пуансона в расчётных сечениях $d_{\text{п}i}^{\text{н}}, d_{\text{п}i}^{j}, d_{\text{п}i}^{\text{в}}$;
- расстояния расчётных сечений от торца пуансона $h_{\text{п}i}^{\text{н}}, h_{\text{п}i}^{j}, h_{\text{п}i}^{\text{в}}$;
- радиусы сопряжения боковых и торцовых поверхностей пуансона $R_{\text{п}i}, r_{\text{п}i}$;
- высота рабочей части пуансона $H_{\text{п}i}$.

Исполнительные размеры рабочего инструмента рассчитывают по номинальным размерам заготовки и инструмента с учетом величины допустимой разностенности, степени и направления износа пуансона и матрицы, а также упругих и температурных деформаций заготовки и инструмента в соответствии с методикой, изложенной в п. 8.8.7.

Последовательность расчёта размеров рабочего инструмента и расчётные формулы приведены в табл. 8.30.

Таблица 8.30

Расчёт исполнительных размеров рабочего инструмента

Определяемая величина	Расчётная формула	Полученное значение
1	2	3
1. На *i*-х операциях		
Диаметр матрицы (при вытяжке через одну матрицу), $d_{\text{м}i}$; диаметр верхней $d_{\text{м}i}$ и нижней $d_{\text{м}i}$ матриц (при вытяжке через две матрицы)	$d_{\text{м}i,} = \left(d_i - T_{di} - \delta_{\text{y}i}\right)^{+T_{\text{м}i}}$; $d'_{\text{м}i} = \left(d'_i - T'_{di} - \delta_{\text{y}i'}\right)^{+T'_{\text{м}i}}$; $d''_{\text{м}i} = \left(d''_i - T''_{di} - \delta''_{\text{y}i}\right)^{+T''_{\text{м}i}}$	$d_{\text{мсв}} = 15{,}50^{+0{,}027}$; $d''_{\text{м}1} = 13{,}36^{+0{,}027}$; $d'_{\text{м}2} = 12{,}37^{+0{,}027}$; $d''_{\text{м}2} = 11{,}73^{+0{,}027}$; $d'_{\text{м}3} = 10{,}96^{+0{,}027}$; $d''_{\text{м}3} = 10{,}87^{+0{,}027}$
Суммарная упругая деформация матрицы и заготовки: вытяжка через одну матрицу, $\delta_{\text{y}i}$ вытяжка через две матрицы, $\delta'_{\text{y}i}, \delta''_{\text{y}i}$	$\delta_{\text{y}i} = 0{,}0015d_i + 0{,}05S_{\text{ср}i}$; $\delta'_{\text{y}i} = \delta''_{\text{y}i} = 0{,}0015d_i + 0{,}025S_{\text{ср}i}$	$\delta_{\text{усв}} = 0{,}05$; $\delta_{\text{y}1} = 0{,}04$; $\delta_{\text{y}21} = 0{,}03$; $\delta_{\text{y}22} = 0{,}024$; $\delta_{\text{y}31} = 0{,}02$; $\delta_{\text{y}32} = 0{,}02$
Средняя толщина стенки заготовки после вытяжки, $S_{\text{ср}i}$	$S_{\text{ср}i} = \dfrac{\left(S_i^{\text{в}} + S_i^{\text{н}}\right)}{2}$	$S_{\text{ср}1} = 0{,}53$; $S_{\text{ср}21} = 1{,}25$; $S_{\text{ср}22} = 0{,}97$; $S_{\text{ср}31} = 0{,}66$; $S_{\text{ср}32} = 0{,}66$
Допускаемое отклонение на размеры матриц: $T_{\text{м}i}, T'_{\text{м}i}, T''_{\text{м}i}$	$T_{\text{м}i}, T'_{\text{м}i}, T''_{\text{м}i}$ =(H8)	$T_{\text{м}i}, T'_{\text{м}i}, T''_{\text{м}i}$ =0,027
Угол конусности матриц: α_i, α'_i, α''_i	$\alpha_i = \alpha'_i = \alpha''_i = 7^\circ \ldots 15^\circ$	$\alpha_{\text{св}} = 8^\circ$; $\alpha_1 = \alpha''_1 = 8^\circ$; $\alpha_2 = \alpha'_2 = \alpha''_2 = 7^\circ 30'$; $\alpha_3 = \alpha'_3 = \alpha''_3 = 7^\circ 30'$
Высота цилиндрического пояска матриц, $h_{\text{ц}i}$	$h_{\text{ц}i} = (0{,}03 \ldots 0{,}05)d_{\text{м}i}$	$h_{\text{цсв}} = 0{,}63$; $h''_{\text{ц}2} = 0{,}56$; $h''_{\text{ц}1} = 0{,}60$; $h'_{\text{ц}3} = 0{,}54$; $h'_{\text{ц}2} = 0{,}58$;

		$h''_{\text{ц}3} = 0{,}52$

Продолжение табл.8.30

1	2	3
Диаметр пуансона в нижнем расчётном сечении, $d^{\text{н}}_{\text{п}i}$	$d^{\text{н}}_{\text{п}i} = \left(d^{\text{н}}_i + \Pi^{\text{н}}_{\text{п}i} + T^{\text{н}}_{\text{п}i}\right)_{-T_{\text{п}i}}$	$d^{\text{н}}_{\text{п}1} = 10{,}19_{-0{,}022}$; $d^{\text{н}}_{\text{п}2} = 9{,}68_{-0{,}022}$; $d^{\text{н}}_{\text{п}3} = 9{,}06_{-0{,}022}$
Диаметр пуансона в верхнем расчётном сечении, $d^{\text{в}}_{\text{п}i}$	$d^{\text{в}}_{\text{п}i} = \left(d^{\text{в}}_i + \Pi^{\text{в}}_{\text{п}i} + T^{\text{в}}_{\text{п}i}\right)_{-T_{\text{п}i}}$	$d^{\text{в}}_{\text{п}1} = 10{,}61_{-0{,}022}$; $d^{\text{в}}_{\text{п}2} = 10{,}06_{-0{,}022}$; $d^{\text{в}}_{\text{п}3} = 10{,}18_{-0{,}022}$
Припуск на износ пуансона в нижнем расчетном сечении, $\Pi^{\text{н}}_{\text{п}i}$	$\Pi^{\text{н}}_{\text{п}1} = \Delta d^{\text{н}}_{\text{п}1}$; $\Pi^{\text{н}}_{\text{п}i} = (0{,}5\ldots 0.75)T^{\text{н}}_{d\text{п}i}$	$\Pi^{\text{н}}_{\text{п}i} = 0{,}011$
Припуск на износ пуансона в верхнем расчетном сечении, $\Pi^{\text{в}}_{\text{п}i}$	$\Pi^{\text{в}}_{\text{п}1} = \Delta d^{\text{в}}_{\text{п}1}$; $\Pi^{\text{в}}_{\text{п}i} = (0{,}5\ldots 0.75)T^{\text{в}}_{d\text{п}i}$	$\Pi^{\text{в}}_{\text{п}i} = 0{,}011$
Допуск на неточность изготовления пуансона в нижнем расчётном сечении, $T^{\text{н}}_{d\text{п}i}$	$T^{\text{н}}_{d\text{п}i} = \lvert h8 \rvert$	$T^{\text{н}}_{d\text{п}i}$ =0,022
Допуск на неточность изготовления пуансона в верхнем расчётном сечении, $T^{\text{в}}_{d\text{п}i}$	$T^{\text{в}}_{d\text{п}i} = \lvert h8 \rvert$	$T^{\text{в}}_{d\text{п}i}$ =0,022
Допускаемые отклонения на размеры пуансона, $T^{\text{н}}_{\text{п}i}, T^{\text{в}}_{\text{п}i}$	$\lvert h8\ldots h10 \rvert$	
Расстояние от торца пуансона до нижнего расчётного сечения, $h^{\text{н}}_{\text{п}i}$	$h^{\text{н}}_{\text{п}i} = h^{\text{н}}_i$	$h^{\text{н}}_{\text{п}1}$ =2,75; $h^{\text{н}}_{\text{п}2}$ =2,36; $h^{\text{н}}_{\text{п}3}$ =1,25
Расстояние от торца пуансона до верхнего расчётного сечения, $h^{\text{в}}_{\text{п}i}$	$h^{\text{в}}_{\text{п}i} = h^{\text{в}}_i$	$h^{\text{в}}_{\text{п}1}$ =11,56; $h^{\text{в}}_{\text{п}2}$ =14,59; $h^{\text{в}}_{\text{п}3}$ =26,20

Радиус сопряжения боковой и торцевой поверхности пуансона, $r_{пi}$	$r_{пi} = r_i$	$r_{п1}$=2,8; $r_{п2}$=2,4; $r_{п3}$=2,10

Продолжение табл. 8.30

1	2	3
2. На финишных операциях		
Высота рабочей (конической) части пуансона, $H_{п1}, H_{пi}$	$H_{п1} = (1{,}2\ldots1{,}5)\left(h_1^{в} - h_1^{н}\right) + h_1^{н}$; $H_{пi} = \left(H_i - S_i^{д}\right) + (10\ldots15)$	$H_{п1}$=16,0; $H_{п2}$=34,0; $H_{п3}$=50,0
Диаметр матрицы (при вытяжке через одну матрицу), $d_{мп}$; диаметр верхней $d_{мп}$ и нижней $d_{мп}$ матриц (при вытяжке через две матрицы)	$d_{мп} = \left(d_{ni} - T_{dn} - \delta_{уп}\right)^{+T_{мп}}$; $d'_{мп} = \left(d'_n - T'_{dn} - \delta'_{уп}\right)^{+T'_{мп}}$; $d''_{мп} = \left(d''_n - T''_{dn} - \delta''_{уп}\right)^{+T''_{мп}}$	$d'_{м1} = 9{,}80^{+0{,}027}$; $d''_{м2} = 9{,}712$;
Суммарная упругая деформация матрицы и заготовки: вытяжка через одну матрицу, $\delta_{уп}$ вытяжка через две матрицы, $\delta'_{уп}, \delta''_{уп}$	$\delta_{уп} = (0{,}002\ldots0{,}003)d_n + 0{,}07S_{срп}$; $\delta'_{уi} = \delta''_{уi} = (0{,}002\ldots0{,}003)d_n + 0{,}035S_{срп}$	$\delta'_{уп} = \delta''_{уп}$=0,05
Средняя толщина стенки заготовки после вытяжки, $S_{срп}$	$S_{срп} = \frac{\left(S_n^{в} + S_n^{н}\right)}{2}$	$S_{срп} = 0{,}535$
Допускаемое отклонение на размеры матриц: $T_{мi}, T'_{мi}, T''_{мi}$	$T_{мп}, T'_{мп}, T''_{мп}$=(H7)-(H9)	$T'_{мп}$=0,027; $T''_{мп}$=0,022
Угол конусности матриц: α_n, α'_n, α''_n	$\alpha_n = \alpha'_n = \alpha''_n = 7^\circ\ldots15^\circ$	$\alpha_n = \alpha'_n$ $\alpha''_n = 7^\circ30'$
Высота цилиндрического пояска матриц, $h_{цп}$	$h_{цп} = (0{,}05\ldots0{,}07)d_{мп}$	$h'_{ц1} = 0{,}70 \approx 1{,}0$; $h''_{ц2} = 0{,}70 \approx 1{,}0$
Диаметр пуансона в любом расчётном сечении, $d_{пп}^{н}$	$d_{пп}^{j} = \left(d_n^{j} + \Pi_{пп}^{j} + T_{пп}^{j} - \delta_t^{j}\right)_{-T_{пп}}$	$d_{пп}^{н} = 8{,}106_{-0{,}022}$; $d_{пп}^{II} = 8{,}306_{-0{,}022}$; $d_{пп}^{III} = 8{,}654_{-0{,}022}$;

		$d_{\text{пп}}^{IV} = 8{,}923_{-0{,}022}$; $d_{\text{пп}}^{\text{с}} = 9{,}102_{-0{,}022}$; $d_{\text{пп}}^{V} = 9{,}321_{-0{,}022}$; $d_{\text{пп}}^{\text{в}} = 9{,}321_{-0{,}022}$

Окончание табл. 8.30

1	2	3
Припуск на износ пуансона в любом расчетном сечении, $\Pi_{\text{пп}}^{j}$	$\Pi_{\text{пп}}^{j} = (0\ldots0{,}25)T_{d\text{пп}}^{j}$	$\Pi_{\text{пп}}^{j} = 0{,}0055$
Допуск на неточность изготовления пуансона в любом расчётном сечении, $T_{d\text{пп}}^{j}$	$T_{d\text{пп}}^{j} = \lvert h8 \rvert$	$T_{d\text{пп}}^{j}$ =0,022
Допускаемые отклонения на размеры пуансона в любом расчётном сечении, $T_{\text{пп}}^{j}$	$\lvert h8\ldots h10 \rvert$	
Тепловая деформация в любом расчётном сечении, δ_t^{j}	$\delta_t^{j} = (0{,}005\ldots0{,}010)d_{\text{пп}}^{j}$	$\delta_t^{\text{н}}$ =0,0406; δ_t^{II} =0,0416; δ_t^{III} =0,0143; δ_t^{IV} =0,0447; $\delta_t^{\text{с}}$ =0,0456; $\delta_t^{V} = \delta_t^{\text{в}}$ =0,0467
Расстояние от торца пуансона до любого расчётного сечения, $h_{\text{пп}}^{j}$	$h_{\text{пп}}^{j} = h_n^{j}$	$h_{\text{пп}}^{\text{н}} = 2{,}0$; $h_{\text{пп}}^{II} = 4{,}0$; $h_{\text{пп}}^{III} = 10{,}76$; $h_{\text{пп}}^{IV} = 17{,}50$; $h_{\text{пп}}^{\text{с}} = 25{,}34$; $h_{\text{пп}}^{V} = 28{,}99$; $h_{\text{пп}}^{\text{в}} = 33{,}71$
Радиус сопряжения боковой и торцевой поверхности пуансона, $r_{\text{пп}}$	$r_{\text{пп}} = r_n$	$r_{\text{пп}} = r_n$ =2,0
Высота рабочей (конической) части пуансона, $H_{\text{пп}}$	$H_{\text{пп}} = \left(H_n - S_n^{\text{д}}\right) + (10\ldots15)$	$H_{\text{пп}}$ =52,5-3,4+10=59,1

8.9.8. Расчёт технологических усилий при вытяжке с утонением

Расчет технологических усилий выполнен по методике, изложенной в п. 8.8.9 с использованием формул (8.138)…(8.144).

Результаты расчёта усилий на вытяжных операциях приведены в табл. 8.31.

Т а б л и ц а 8.31

Результаты расчёта технологических усилий

Рассчитанная величина	Единица измерения	1-я вытяжка	2-я вытяжка	3-я вытяжка	4-я вытяжка
$\theta_{ср}$	-	-	6°52′	7°	6°35′
$e_{i\text{ср}}^{в}$	-	-	1,09	0,20	0,58
$\sigma_i = f\left(e_{i\text{ср}}^{в}\right)$	МПа	595	770	556	735,6
ψ_i^j	-	-	0,29	0,29	0,19
B	-	-	0,14	0,14	0,19
K	-	-	-0,48	-1,3	-0,43
σ_r	МПа	-	323	658	69,7
$\tau_м$	МПа	-	32,3	65,8	6,97
$P_{вз}$	Н	-	70823	3610	21582
q	МПа	344	170	80,8	343,8
$F_{iп}^{н}$	мм^2	81,03	73,1	64,4	51,63
P_1	Н	27850	12700	5200	17750
P_Σ	Н	27850	83523	8811	39332
$P_{сi}$	Н	178,3	286	468	725

Библиографический список

1. *Агеев Н.П.*, Данилин Г.А., Огородников В.П. Технология производство патронов стрелкового оружия. Ч 2. Процессы штамповки: учебник / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2006. 533 с.

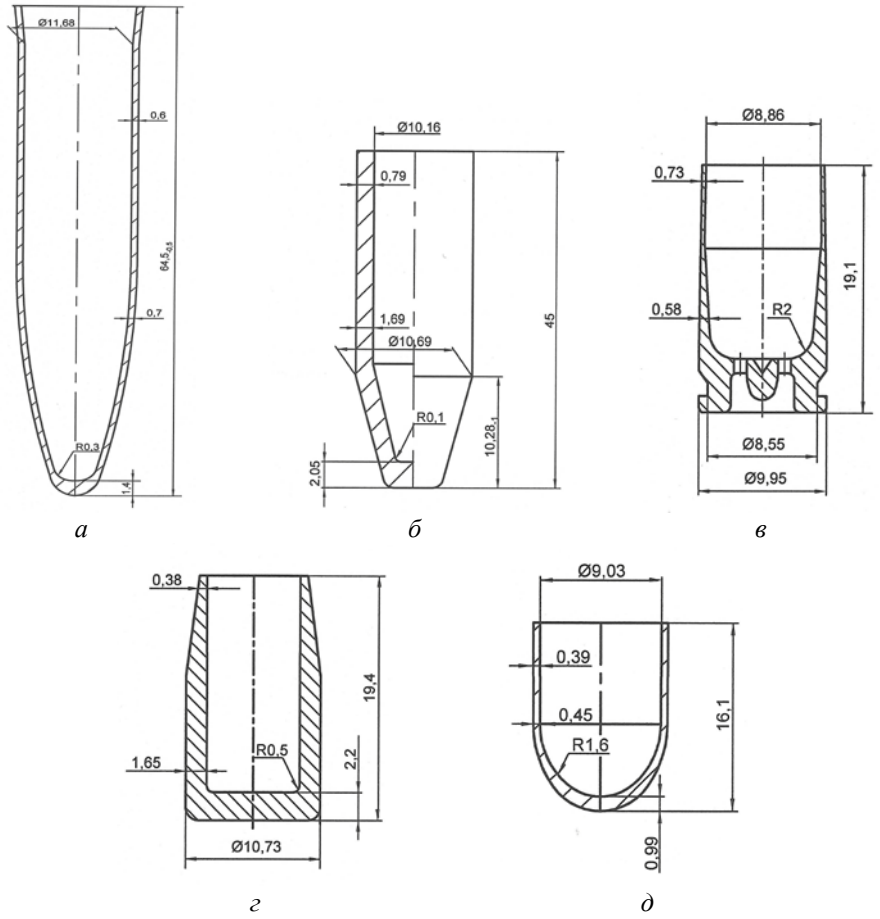
2. РМО 819-56. Методика расчета рабочего инструмента для изготовления патронов из их элементов. 1956. 69 с.

3. РТМ 3-1279-80. Инструмент рабочий технологический для операции «Вытяжка с утонением».

9. КОМБИНИРОВАННАЯ ВЫТЯЖКА

9.1. Область применения процесса комбинированной вытяжки

Комбинированная вытяжка применяется для изготовления полых цилиндрических деталей в приборо- и машиностроении, а также в патронном производстве для изготовления металлических элементов патронов: оболочек, пиростаканов, корпусов трассеров и некоторых гильз (рис. 9.1).Отличительной особенностью комбинированной вытяжки является значительное изменение диаметра и принудительное утонение стенки заготовки.



а *б* *в*

г *д*

Рис. 9.1. Металлические элементы патронов, изготавливаемые комбинированной вытяжкой: *а* – оболочка; *б* – пиростакан; *в* – пистолетная гильза; *г* – корпус трассера; *д* – оболочка к пистолетному патрону

Комбинированная вытяжка – процесс пластического формоизменения плоской или полой заготовки путем втягивания пуансоном в матрицу с одновременным существенным уменьшением ее периметра и принудительным утонением стенки. Применяется для изготовления относительно высоких ($h/d \leq 5...6$) полых деталей с толщиной стенки меньше, чем толщина дна в 1,5…3,0 раза. При изготовлении пульных оболочек и гильз на последней (финишной) операции, как правило, формируются заданные механические характеристики за счет упрочнения материала.

9.2. Способы проведения комбинированной вытяжки

Различают два способа комбинированной вытяжки: первая вытяжка (свёртка) – из плоской, круглой, либо призматической заготовки; последующая вытяжка – из полой заготовки с дном.

Первая вытяжка-свёртка может производиться через одну или две матрицы. Рабочая часть верхней матрицы может быть радиальной (рис. 9.2,*а*), одноконусной (рис. 9.2,*б*), двухконусной (рис. 9.2,*в*) формы.

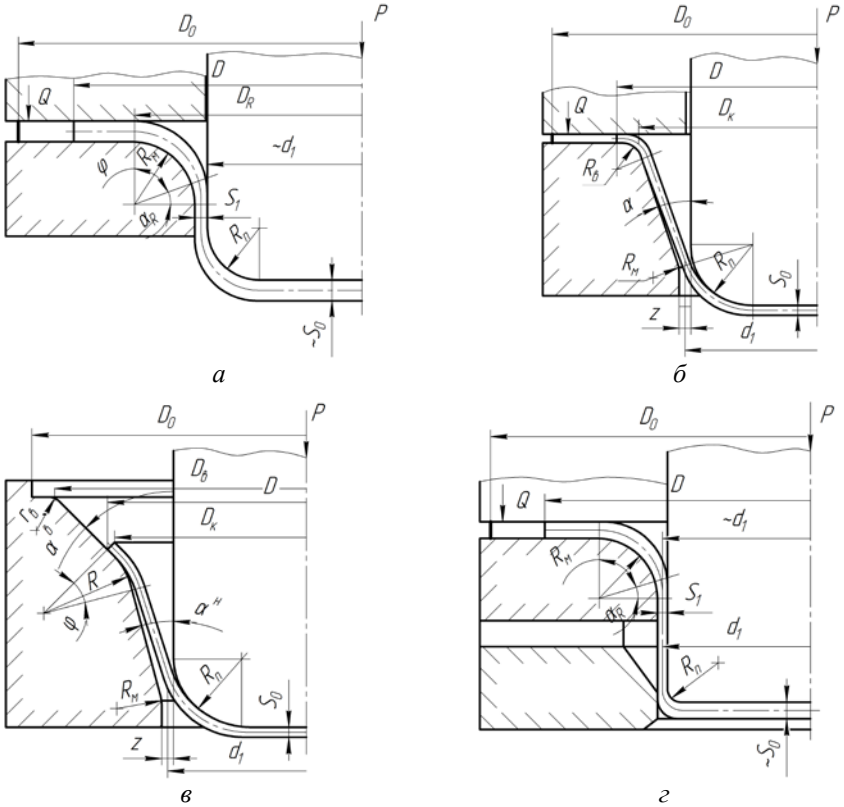


Рис. 9.2. Схемы первой операции (свёртки) комбинированной вытяжки: *а* – на радиальной матрице; *б* – на одноконусной матрице; *в* – на двухконусной матрице; *г* – через две матрицы

Для увеличения степени деформации и снижения разностенности первую вытяжку проводят через две матрицы (рис. 9.2,*г*). Одноконусную матрицу применяют для вытяжки относительно толстых заготовок ($S_0/D_0 > 0{,}05$), радиальную – для заготовок различной толщины и тогда, когда требуется складкодержатель, т.е. $S_0/D_0 < 0{,}05$. Двухконусная матрица применяется в тех случаях, когда толщина стенки критическая с точки зрения возможности складкообразования ($S_0/D_0 < 0{,}05$). При вытяжке через две матрицы на верхней производят изменение диаметра и небольшое утонение, а на нижней – принудительное утонение стенки – протяжку.

Ограничениями процесса комбинированной свёртки являются:

- отрыв дна – в случае превышения в опасном сечении действующими осевыми напряжениями их предельно допустимых значений;
- образование складок во фланце – в случае вытяжки относительно тонких заготовок ($S_0/D_0 < 0{,}05$);
- превышение допустимых значений относительной разностенности δ_s деталей.

Условие прочности для опасного сечения записывается в следующем виде:

$$\sigma_z < [\sigma] = 1{,}15\sigma_в, \tag{9.1}$$

где

$$\sigma_z = 1{,}15 \cdot \sigma_i \left\{ \left[1 + \frac{\mu_i}{\sin\alpha} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\rho\max}}{1{,}15 \cdot \sigma_s} \right) - \frac{\mu_i + \mu_i}{2 \cdot \sin\alpha} \cdot \ln\frac{1}{m_s} \right] \cdot \ln\frac{1}{m_s} + \right.$$

$$\left. + \frac{\sigma_{\rho\max}}{1{,}15 \cdot \sigma_s} + \frac{\sin\alpha}{2} \right\};$$

$$\sigma_i \approx \sigma_в \cdot \left(\frac{1 - m_d \cdot m_s}{\psi_y} \right)^{\frac{\psi_y}{1-\psi_y}};$$

$$\sigma_{\rho\max} = 1{,}1 \cdot \sigma_i \frac{\left(\ln\cdot\frac{1}{m_d} + \frac{S_0}{4 \cdot R_м} \right) \cdot \left(1 + 1{,}5 \cdot \mu_м \right)}{1 - \frac{0{,}2 \cdot \mu_м \cdot \left(1 + 1{,}5 \cdot \mu_м \right)}{m_d} \cdot \left(1 - \frac{18 \cdot S_d}{1 - m_d} \right)} \tag{9.2}$$

– свертка через радиальную и одноконусную матрицу с плоским прижимом;

$$\sigma_{\rho\max} = 1{,}1 \cdot \sigma_i \cdot \left(\ln\cdot\frac{D_0}{d} + \frac{2 \cdot \mu_м}{1{,}1 \cdot \sigma_s \cdot \pi \cdot D \cdot S_0} + \frac{S_0}{4 \cdot R_{мс}} \right) \cdot e^{\mu_м \cdot \varphi} \tag{9.3}$$

– свертка через двухконусную матрицу без прижима;

$\mu_м$, $\mu_п$ – коэффициент трения на контактных поверхностях заготовки с матрицей и пуансоном соответственно ($\mu_м$ = 0,10, $\mu_п$ = 0,12 – для латуни, биметалла 1 и биметалла 3; $\mu_м$ = 0,14, $\mu_п$ = 0,16 – для стали); $R_м$ – радиус вытяжной кромки матрицы ($R_м$ = (6÷10)S_0); m_s – коэффициент утонения стенки, $m_s = S/S_0$; m_d – коэффициент вытяжки ($m_d = d/D_0$); S_0 – толщина исходной заготовки; S – толщина стенки детали; S_d – относительная толщина плоской заготовки ($S_d = S_0/D_0$); D_0 – диаметр заготовки; d – диаметр детали по срединной поверхности, $d = d_м - S$; $d_м$ – диаметр матрицы; $R_{мс}$ – радиус кривизны срединной поверхности заготовки на вытяжной кромке матрицы, $R_{мс} = R_м + S_0/2$; φ – угол охвата кромки матрицы заготовкой в зоне очага деформации; $\varphi = 90 - \alpha_R$; $\alpha_R = \alpha$ (α – угол конусности матрицы, для двухконусной матрицы – $\alpha = \alpha_н$, для радиальной матрицы – $\alpha = \alpha_R = \arccos\frac{R_м + S}{R_м + S_0}$).

Вторым ограничением операции свёртки является образование складок при небольшой относительной толщине заготовки. Условие невозможности образования складок: $S/D_0 \geq 0{,}05$. Во избежание образования складок необходимо применять прижим или двухконусную матрицу.

В табл. 9.1 приведены значения предельных показателей степени деформации на первой и последующих операциях комбинированной вытяжки через одну и две матрицы.

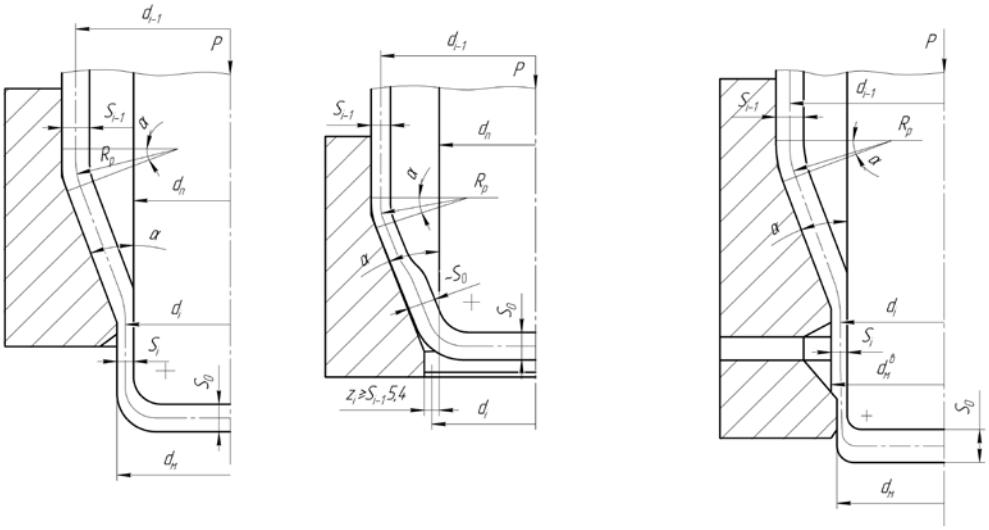
Таблица 9.1

Показатели предельной степени деформации на первой и последующей операциях комбинированной вытяжки

Материал	Величина характеристики механических свойств материала				Первая операция			Последующие операции		
	$\sigma_{0,2}$, МПа	φ_y	ε_{ip}	ε_{iy}	m_d	m_s	e_i	m_d	m_s	e_i
Сталь 18ЮА	300	0,16	1,39	0,17	0,45	0,6	1,44	0,78	0,40	1,40
Сталь 11КП	230	0,27	1,00	0,26	0,48	0,7	1,20	0,79	0,50	1,02
Биметалл 1	249	0,23	1,44	0,28	0,45	0,65	1,35	0,78	0,40	1,40
Биметалл 3	245	0,79	1,55	0,26	0,45	0,65	1,35	0,78	0,40	1,40
Латунь Л70	83	0,79	1,58	0,47	0,51	0,7	1,13	0,77	0,55	0,94

Последующие операции комбинированной вытяжки проводят:

- через одну матрицу – заготовок с одинаковой толщиной стенки и дна (рис. 9.3,*а*);
- через одну матрицу – заготовок с толщиной стенки меньшей, чем толщина дна (рис. 9.3,*б*);
- через две матрицы – заготовки с одинаковой толщиной стенки и дна (рис. 9.3,*в*);
- через две матрицы – заготовки с толщиной стенки меньшей, чем толщина дна.



а *б* *в*

Рис. 9.3. Схемы последующих операций комбинированной вытяжки

Ограничения процесса последующих операций комбинированной вытяжки:

- возможность отрыва дна – в случае превышения предельной степени деформации;
- образование кольцевого отпечатка на наружной поверхности придонной части корпуса при вытяжке заготовки с $S_{дн} > S$;
- большая разностенность при нерациональном распределении степеней деформации на верхней и нижней матрицах.

Отрыв дна возможен при невыполнении условия прочности: $\sigma_z < [\sigma]=1,15\sigma_в$.

При вытяжке через одну матрицу максимальные растягивающие напряжения σ_z рассчитываются по формуле

$$\sigma_z = 1{,}15 \cdot \sigma_i \left\{ \left[1 + \frac{\mu_м}{\sin\alpha} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\rho\max}}{1{,}15 \cdot \sigma_s} \right) - \frac{\mu_п - \mu_м}{2 \cdot \sin\alpha} \cdot \ln\frac{1}{m_s} \right] \cdot \ln\frac{1}{m_s} + \right.$$
$$\left. + \frac{\sigma_{\rho\max}}{1{,}15 \cdot \sigma_s} + \frac{\sin\alpha}{2} \right\}, \qquad (9.4)$$

где $\sigma_i = \sigma_в \cdot \left(\frac{1 - m_d \cdot m_s}{\psi_y} \right)^{\frac{\psi_y}{1-\psi_y}}$,

$$\sigma_{\rho\max} = 1{,}1 \cdot \sigma'_{i\rho} \cdot \left[\left(1 + \frac{\mu_м}{\mathrm{tg}\alpha} \right) \cdot \ln\frac{1}{m_{d_i}} + 0{,}66 \cdot \sin\alpha \cdot \sqrt{\frac{s_{i-1}}{d_{i-1}}} \right] \qquad (9.5)$$

– максимальное растягивающее напряжение в опасном сечении заготовки;

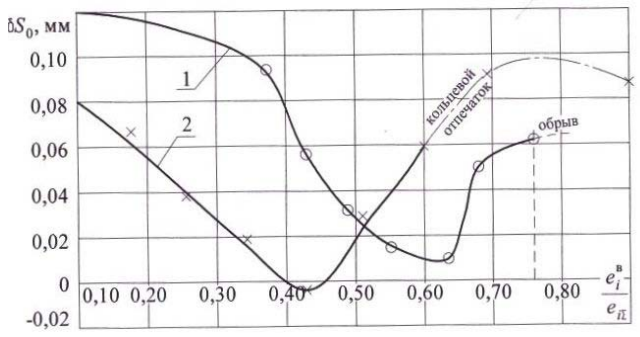
$$\sigma'_{i\rho} \approx \frac{\sigma_в}{1-\psi_y} \cdot \left(\frac{1-m_d}{\psi_y} \right)^{\frac{\psi_y}{1-\psi_y}}$$

– сопротивление материала деформированию, определяемое с учетом деформационного упрочнения.

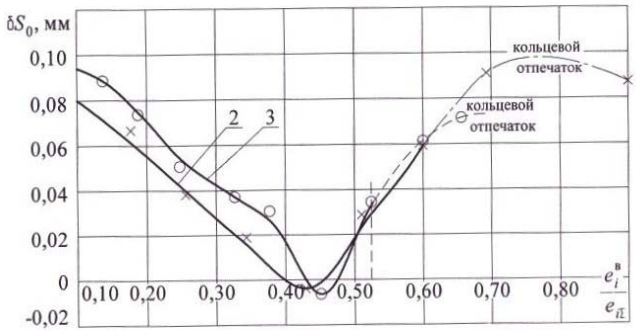
Для исключения образования кольцевого отпечатка целесообразно проводить вытяжку через две матрицы при разделении процесса: деформацию по диаметру осуществляют на верхней матрице, утонение стенки на нижней матрице.

Экспериментально установлено, что разностенность деталей при вытяжке через две матрицы существенно зависит от величины исходной разностенности, состояния материала (отожженный, не отожженный) и соотношения степеней деформаций на нижней и верхней матрицах.

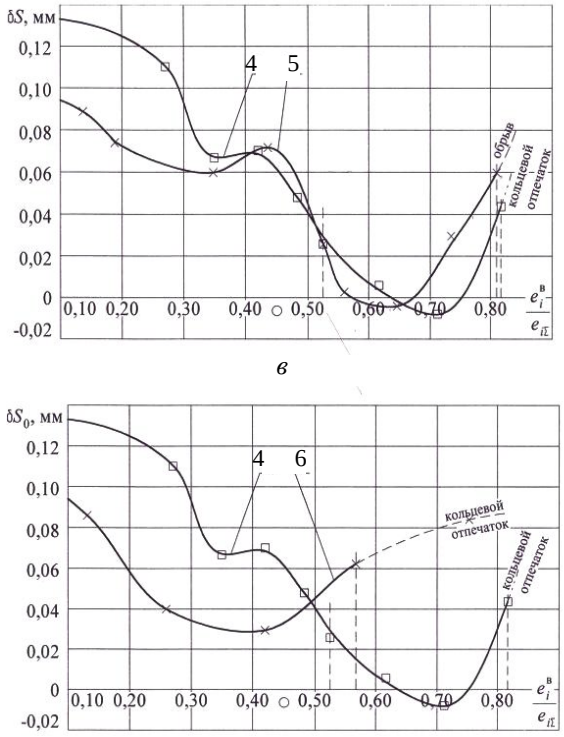
На рис. 9.4 показаны результаты исследования влияния соотношения степеней деформации на нижней и верхней матрицах на величину разностенности. Следует считать, что минимальная разностенность может быть достигнута в диапазоне соотношения $e_i^{\text{â}} / e_{i\Sigma}^{\text{â}} = 0{,}30\ldots0{,}60.$, где $e_i^{\text{â}}$, $e_{i\Sigma}^{\text{â}}$ – степени деформации (верхнее расчетное сечение) в верхней матрице и суммарное значение степени деформации при вытяжке через две матрицы.



а



б



в

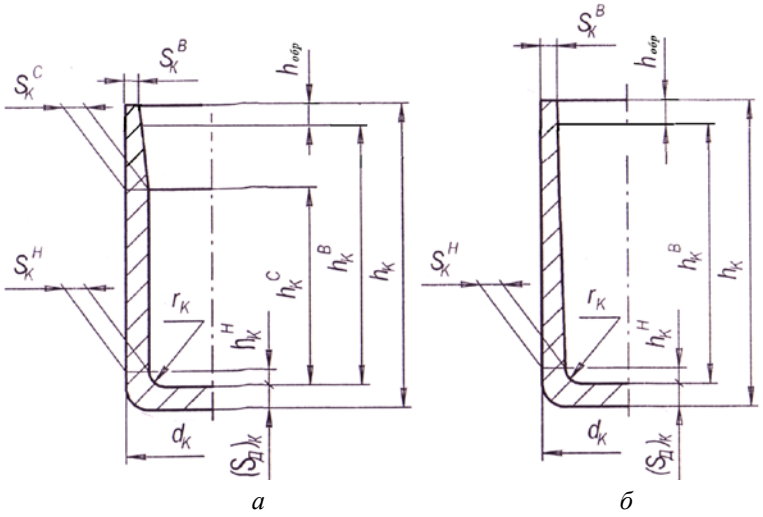
г

Рис. 9.4. Изменение разности разностенностей (ΔS_0–ΔS)в зависимости от отношения степени деформации на верхней матрице к суммарной степени деформации $e_i^{в}/e_{i\Sigma}$: *а*, *б*, – сталь 11КП; *в*, *г* – биметалл 3; *1* – ($e_{i\Sigma}$ = 0,84; *d* = 28,10 мм; S_0 = 1,30 мм; $m_{d\Sigma}$ = 0,70; $m_{S\Sigma}$ = 0,69); *2* – ($e_{i\Sigma}$ = 0,63; *d* = 23,60 мм; S_0 = 1,30 мм; $m_{d\Sigma}$ = 0,84; $m_{S\Sigma}$ = 0,69); *3* – ($e_{i\Sigma}$ = 0,90; *d* = 19,8 мм; S_0 = 1,15 мм; $m_{d\Sigma}$ = 0,75; $m_{S\Sigma}$ = 0,61); *4* – ($e_{i\Sigma}$ = 0,90; *d* = 19,8 мм; S_0 = 1,15 мм; $m_{d\Sigma}$ = 0,75; $m_{S\Sigma}$ = 0,61); *5* – ($e_{i\Sigma}$ = 0,78; *d* = 19,7 мм; S_0 = 1,05 мм; $m_{d\Sigma}$ = 0,76; $m_{S\Sigma}$ = 0,67); *6* – ($e_{i\Sigma}$ = 0,91; *d* = 15,8 мм; S_0 = 1,15 мм; $m_{d\Sigma}$ = 0,80; $m_{S\Sigma}$ = 0,57)

9.3. Определение размеров конечной заготовки (расчетной детали) и оценка возможности её изготовления комбинированной вытяжкой

Размеры расчетной детали необходимы для оценки возможности применения в технологическом процессе комбинированной вытяжки, определения формы и размеров исходной заготовки, расчета количества операций и определения степеней деформации на операциях. Размеры расчетной детали определяют по номинальным размерам готовой детали с учётом допусков, назначения припуска на обрезку и возможного изменения размеров при последующей обработке для окончательного формирования конструктивных элементов.

Перед определением расчетных размеров на чертеже детали выделяют три расчётных сечения: верхнее, среднее и нижнее (рис. 9.5). Верхнее (в.р.с.) располагают на кромке детали с наименьшей толщиной стенки. Нижнее (н.р.с.) соответствует сечению сопряжения стенки с дном. Среднее расчетное сечение (с.р.с.) располагают в месте сопряжения верхнего конструктивного элемента с нижним либо принимают условно там, где толщина стенки равна среднему арифметическому между толщинами стенки в верхнем и нижнем расчетных сечениях. Местоположение расчетного сечения определяется расстоянием от внутренней поверхности дна. Если в с.р.с. размеры не заданы, ограничиваются выделением двух сечений: верхнего и нижнего.



а *б*

Рис. 9.5. Эскизы конечной заготовки: *а* – со ступенчатой образующей внутренней поверхности; *б* – с прямой образующей внутренней поверхности

Расчетные размеры конечной заготовки (рис. 9.5):

- наружный диаметр корпуса, $d_к$;
- толщина стенки корпуса в верхнем, среднем и нижнем расчетных сечениях, $S_к^в$, $S_к^с$, $S_к^н$;
- толщина дна, $(S_д)_к$;
- высота детали, $h_к$;
- расстояние от внутренней поверхности дна до верхнего, среднего и нижнего расчетных сечений, $h_к^в$, $h_к^с$, $h_к^н$;
- внутренний радиус сопряжения корпуса и дна, $r_к$.

Порядок расчета и формулы для определения размеров расчетной детали приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Определение размеров расчетной детали

Определяемая величина	Расчетная формула
Расчетный наружный диаметр корпуса, $d_к$	$d_к = d$
Наибольший диаметр детали, d	Определяется по чертежу детали
Расчетная толщина стенки в в.р.с., $S_к^в$	$S_к^в = S^в$
Толщина стенки детали в в.р.с., $S^в$	Определяется по чертежу детали
Расчетная толщина стенки в н.р.с., $S_к^н$	$S_к^н = S^н$
Толщина стенки детали в н.р.с., $S^н$	Определяется по чертежу детали
Расчетная толщина стенки в с.р.с., $S_к^с$	$S_к^с = (S_к^в + S_к^н)/2$ – если толщина стенки изменяется плавно от в.р.с. до .н.р.с.
Толщина стенки детали в с.р.с., $S^с$	$S_к^с = S^с$ – для ступенчатой детали
Расчетная толщина дна, $(S_д)_к$	Определяется по чертежу детали
Толщина исходной листовой заготовки:	$(S_д)_к = (0{,}95…0{,}97)S_л^*$
если $S_д \geq S^н$	$S_л \geq S_0$
если $S_д < S^н$	$S_л = S_0$
Расчетный внутренний радиус сопряжения корпуса с дном, $r_к$	$r_к = r$ – если радиус задан на чертеже детали $r_к = (0{,}1…0{,}2)d$ – если радиус на чертеже детали не задан
Расстояние от дна до н.р.с., $h_к^н$	$h_к^н = r_к$
Расстояние от дна до с.р.с., $h_к^с$	$h_к^с = h_с$
Расстояние от дна до с.р.с., $h_с$	Определяется по чертежу детали
Расстояние от дна до в.р.с, $h_к^в$	$h_к^в = H_к – S_д$
Расстояние от дна до в.р.с., $h^в$	Определяется по чертежу детали
Расчетная высота детали с учетом припуска на обрезку, $h_к$	$h_к = h_к^в + (S_д)_к + h_{обр}$
Припуск на обрезку, $h_{обр}$	$h_{обр} = \dfrac{(0{,}10...0{,}15)\cdot V_{дет}}{\pi\cdot(d_к - S_к^в)\cdot S_к^в}$
Объем детали, $V_{дет}$	$V_{дет} = G/\gamma$
Масса детали, G	Определяется по чертежу детали
Плотность материала детали, γ	$\gamma = 7800$кг/м^3 – для стали; $\gamma = 7850$кг/м^3 – для биметалла

* Толщина дна расчетной детали нередко принимается по толщине полосы или ленты, из которых традиционно изготавливают такие детали, как оболочки, пиростаканы, трассеры, гильзы.

После определения размеров расчетной детали производят оценку технологичности конструкции детали с целью установления возможности ее изготовления с применением комбинированной вытяжки (табл. 9.3).

Таблица 9.3

Уровни технологичности конструкций деталей, изготавливаемых с применением комбинированной вытяжки

Уровни технологичности	Показатели				
	$h_к/d_к$	$r_к/(S_д)_к$	$S_к^н/S_к^в$	$(S_д)_к/S_к^с$	$S_к^с/D_0^*$
Высокая	0,5…1,0	1,0…2,3	1,1…1,3	1,5…2,6	0,02…0,05
Средняя	1,0…5,0	0,5…1,0	1,0…1,1	1,1…1,5	0,05…0,1
Низкая	>5,0	<0,5	<1,0	0,8…1,0	<0,01

* D_0 – диаметр исходной заготовки.

9.4. Определение формы и размеров заготовки перед вытяжкой

Форма заготовки перед комбинированной вытяжкой – плоская (кружок, реже квадрат или шестигранник).

Расчетные размеры заготовки (рис. 9.6):

- объем V_0;
- наружный диаметр D_0;
- толщина S_0;
- поперечные размеры плоской заготовки a_4, a_6 (для квадрата и шестигранника).

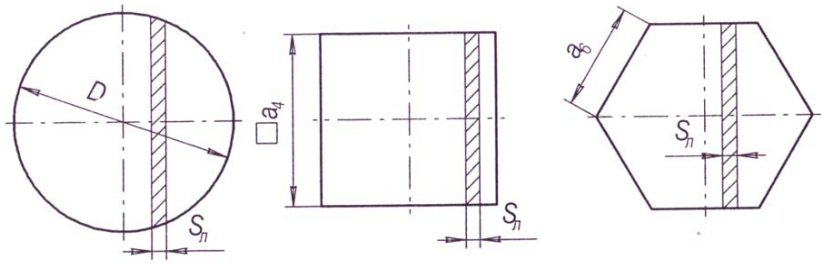


Рис. 9.6. Заготовки для комбинированной вытяжки

Выбор формы плоской заготовки определяется эффективностью раскроя полосы. Наименьший отход металла – при вырубке квадрата и шестигранника, наибольший – при вырубке кружка. Однако применение квадратной или шестигранной заготовки предполагает введение в технологический процесс после свёртки операции вытяжка-выдавливание (см. разд. 12).

Объем заготовки равен:

$$V_0 = V_{\text{дет.}} + V_{\text{обр.}};$$

$$V_{\text{дет.}} = V_{\text{дна}} + V_{\text{цилинд.}};$$

$$\Delta V_{\text{обр.}} = (0{,}10 \ldots 0{,}15) V_{\text{дет.}};$$

$$V_{\text{дна}} = (\pi \cdot d_{\text{к}}^2 / 4) \cdot S_{\text{дна}};$$

$$V_{\text{цилинд.}} = \pi \cdot d_{\text{ср.}} \cdot S_{\text{ср.}} \cdot h.$$

Поперечные размеры заготовок:

- диаметр кружка $D_0 = \sqrt{\dfrac{4 \cdot V_0}{\pi \cdot S_0}}$;
- сторона квадрата $a_4 = \sqrt{\dfrac{V_0}{S_0}}$;
- сторона шестигранника $a_6 = 0{,}62 \cdot \sqrt{\dfrac{V_0}{S_0}}$.

9.5. Расчет количества операций

Определение количества операций и назначение степеней деформации производят исходя из рекомендаций по предельным значениям показателей степеней деформации и тем значениям, которые применяются в производстве цилиндрических деталей.

В качестве показателей деформации используют:

- коэффициент вытяжки $m_{di} = d_i/d_{i-1}$;
- коэффициент утонения стенки $m_{si} = S_i/S_{i-1}$;
- степень деформации $e_i = 1{,}1 \cdot \ln \dfrac{1}{m_{di} \cdot m_{si}}$.

Для определения количества операций рассчитывают суммарный коэффициент вытяжки $m_{d\Sigma}$ и утонения стенки $m_{s\Sigma}$:

$$m_{d\Sigma} = d_к/D_0,$$

$$m_{s\Sigma} = S^{в}_{к}/S_0,$$

где D_0 и S_0 – диаметр и толщина исходной заготовки; $d_к$ и $S^{в}_{к}$ – наружный диаметр и толщина конечной детали в верхнем расчетном сечении.

Если задан закон распределения механических свойств (твердости *HV*) вдоль корпуса конечной детали, определяют степень деформации $e_{iф}$ на финишной (заключительной) операции вытяжки по номограмме (рис. 9.7).

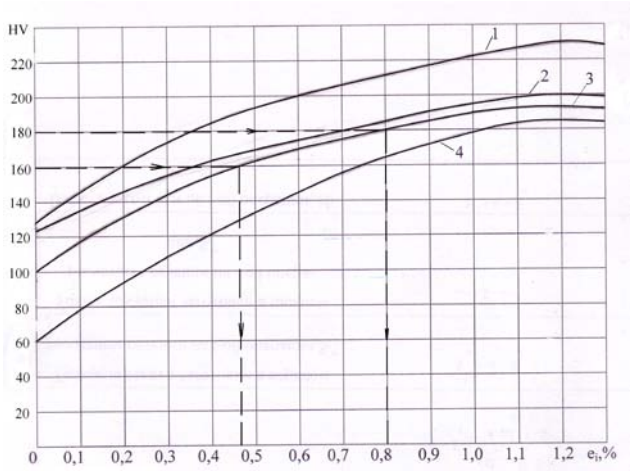


Рис. 9.7. Зависимость твердости HV от степени деформации e_i для материалов:
1 – сталь 18ЮА, 11кп; *2* – биметалл-1; *3* – биметалл-3; *4* – латунь Л70

На номограмме показано определение степени деформации на финишной операции, обеспечивающей заданную твердость *HV* ведущей части большинства пульных оболочек из биметалла-3.

Возможность изготовления детали за одну операцию – свёртку – определяют путем проверки следующих неравенств.

Если $m_{d\Sigma} > \kappa \cdot m_{d\text{пред.}}$ и $m_{s\Sigma} > \kappa \cdot m_{s\text{пред.}}$, то деталь можно изготовить за одну операцию, где $\kappa = 1{,}1$ – коэффициент запаса, $m_{d\text{пред.}}$, $m_{s\text{пред.}}$ – предельные значения коэффициентов вытяжки и утонения, которые принимают по рекомендациям (см. табл. 9.1). В этом случае $m_{d\text{св.}} = m_{d\Sigma}$ и $m_{s\text{св.}} = m_{s\Sigma}$.

Если хотя бы одно из этих неравенств не выполняется, то проверяют возможность изготовления детали за две операции. Тогда принимают $m_{d\text{св}} = \kappa \cdot m_{d\text{пред.}}$, $m_{s\text{св}} = \kappa \cdot m_{s\text{пред.}}$. Определяют на последующей первой вытяжке $m_{d1} = m_{d\Sigma} / m_{d\text{св}}$, $m_{s1} = m_{s\Sigma} / m_{s\text{св.}}$.

Для последующих операций проверяют условие (см. табл. 9.1):

$$m_{d1} \geq \kappa \cdot m_{d\text{пред.}}, \quad m_{s1} \geq \kappa \cdot m_{s\text{пред}} .$$

Если это условие выполняется, то деталь можно изготовить за две операции и т.д., если не выполняется, то проверяют возможность изготовления детали за три операции. Принимают на последующих первой и второй вытяжках одинаковые значения m_d и m_s:

$$m_{d1} = m_{d2} = \sqrt{\frac{m_{d\Sigma}}{m_{d\text{св}}}}, \qquad m_{s1} = m_{s2} = \sqrt{\frac{m_{s\Sigma}}{m_{s\text{св}}}},$$

после этого проверяют для последующих операций условие (см. табл. 9.1): $m_{d1} = m_{d2} > \kappa \cdot m_{d\text{пред.}}$; $m_{s1} = m_{s2} > \kappa \cdot m_{s\text{пред.}}$ и т.д.

После окончательного определения количества операций и показателей m_{di} и m_{si} на каждой операции устанавливают возможность обеспечения заданных механических свойств на последней операции: $e_{in} = 1{,}1 \cdot \ln \frac{1}{m_{dn} \cdot m_{sn}}$;

если $e_{in} = e_{i\text{ф}}$, то заданные механические свойства обеспечены, если $e_{in} < e_{i\text{ф}}$, то уменьшают значения m_{dn} и m_{sn} до выполнения равенства. При этом одновременно корректируют на предпоследней операции значения $m_{dn\text{-}1}$ и $m_{sn\text{-}1}$. После окончательного назначения показателей степени деформации проверяют выполнение тождества

$$m_{d\Sigma} = m_{d\text{св.}} \cdot m_{d1} \cdot m_{d2} \cdot \ldots \cdot m_{dn}, \quad m_{s\Sigma} = m_{s\text{св.}} \cdot m_{s1} \cdot m_{s2} \cdot \ldots \cdot m_{sn}.$$

Для повышения допустимой степени деформации, исключения дефектов в виде придонного кольцевого отпечатка и снижения разностенности комбинированную вытяжку целесообразно проводить через две матрицы. На верхней матрице производят уменьшение диаметра, а на нижней – утонение стенки. Тогда при распределении показателей деформации m_d и m_s на любой i-й операции следует придерживаться следующего правила: на верхней матрице $m^{\text{в}}_d = m_{di}$, $m^{\text{в}}_s = 1{,}0$; на нижней $m^{\text{н}}_d \approx 1{,}0$, $m^{\text{н}}_s = m_{si}$.

Необходимо помнить, что при таком распределении показателей m_d и m_s на верхней матрице будет происходить утонение придонного барьера до выравнивания толщины этой части заготовки с боковой стенкой, что увеличивает действительную степень деформации.

Для обеспечения минимальной разностенности и исключения других дефектов при вытяжке через две матрицы необходимо придерживаться рационального соотношения степеней деформации на верхней $e^{в}_i$ и нижней $e^{н}_i$ матрицах, используя график рис. 9.8, где входными параметрами являются

$$e^{в}_i = 1{,}1 \cdot \ln \frac{1}{m^{в}_s \cdot m^{в}_d}; \qquad e_{i\Sigma} = 1{,}1 \cdot \ln \frac{1}{m_{si} \cdot m_{di}}.$$

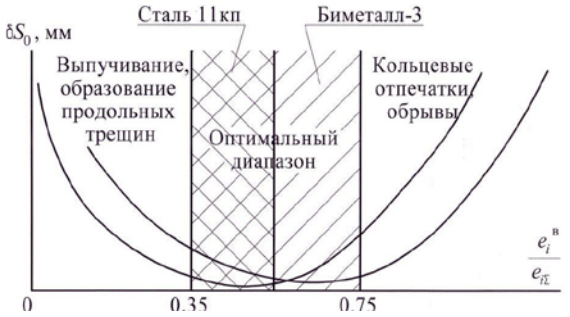


Рис. 9.8. Оптимальный диапазон соотношения величины деформации на верхней матрице к суммарной деформации

9.6. Определение формы и размеров заготовок после промежуточных вытяжек

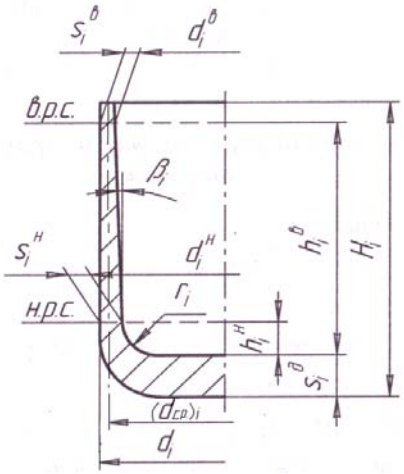


Рис. 9.9. Эскиз заготовки после промежуточной вытяжки

После того как рассчитаны размеры заготовки D_0 и S_0 и назначены показатели степени деформации на каждой операции, определяют размеры заготовок после каждой операции, используя усилие сохранения постоянства объемов заготовки до и после штамповки (рис. 9.9).

Последовательность расчета и расчетные формулы приведены в табл. 9.4.

Таблица 9.4

Определение размеров заготовок после промежуточных вытяжек

Определяемая величина	Расчетная формула
Средний диаметр, $d_{ср.}$: после свёртки после последующей вытяжки	$d_{ср} = D_0 \cdot m_{dсв}$ $d_{ср.i} = d_{ср.i-1} \cdot m_{di}$
Наружный диаметр на i-й операции, d_i	$d_{нi} = d_{ср.i} + S_i^{в}$
Толщина стенки заготовки в в.р.с.,$S_i^{в}$: после свёртки после последующей вытяжки	$S_i^{в} = S_0 \cdot m_{sсв}$ $S_i^{в} = S_{i-1}^{в} \cdot m_{si}$
Толщина стенки заготовки в н.р.с., $S_i^{н}$ Размеры:$S^{н}_{к}$, $S^{в}_{к}$ для расчётной детали	$S_i^{н} = S_i^{в} + \left(S_к^{н} - S_к^{в}\right)$
Толщина дна, $S_{дн.i}$	$S_{дн.i} = (0{,}95...1{,}0)S_0$
Высота на i-й операции, H_i	$H_i = \frac{\left(D_0^2 - d_i^2\right) \cdot S_0}{4 \cdot d_{ср.i} \cdot S_{iср}} + S_д$
Внутренний диаметр в в.р.с. на i-й операции, $d^{в}_{вi}$	$d_{вi}^{в} = d_i - 2S_i^{в}$
Внутренний диаметр в н.р.с. на i-й операции, $d^{н}_{вi}$	$d_{вi}^{н} = d_i - 2S_i^{н}$
Радиус сопряжения внутренней поверхности дна со стенкой, r_i	$r_i = (0{,}10...0{,}12)d_i$
Расстояние н.р.с. от внутренней поверхности дна на i-й операции, $h^{н}_i$	$h_i^{н} = r_i$
Расстояние в.р.с. от внутренней поверхности дна на i-й операции, $h^{в}_i$	$h_i^{в} = H_i - S_д - \frac{\Delta V}{\pi \cdot d_{ср.i} \cdot S_i^{в}}$
Объем припуска на обрезку, ΔV (см. п. 9.4.)	$\Delta V = (0{,}10...0{,}15)V_{дет}$

9.7. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента

9.7.1. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента на свёртке

Комбинированную вытяжку из плоской заготовки (свёртку) осуществляют через одну или две матрицы. Форма рабочей части матрицы бывает радиальной (рис. 9.10,*а*), двухконусной (рис. 9.10,*б*) и одноконусной (рис. 9.10,*в*). Наиболее рационально применение радиальной или двухконусной матриц, которые в большей степени обеспечивают невозможность образования складок при втягивании заготовки в рабочее пространство. Одноконусную матрицу применяют при сравнительно большой относительной толщине $S_0/D_0 \geq 0{,}05$.

Для обеспечения большей степени деформации, уменьшения разностенности и снижения технологического усилия нередко свёртку проводят через две матрицы. При этом на верхней (радиальной, двухконусной) обеспечивают изменение диаметра, а на нижней (рис. 9.10,*г*) – утонение стенки.

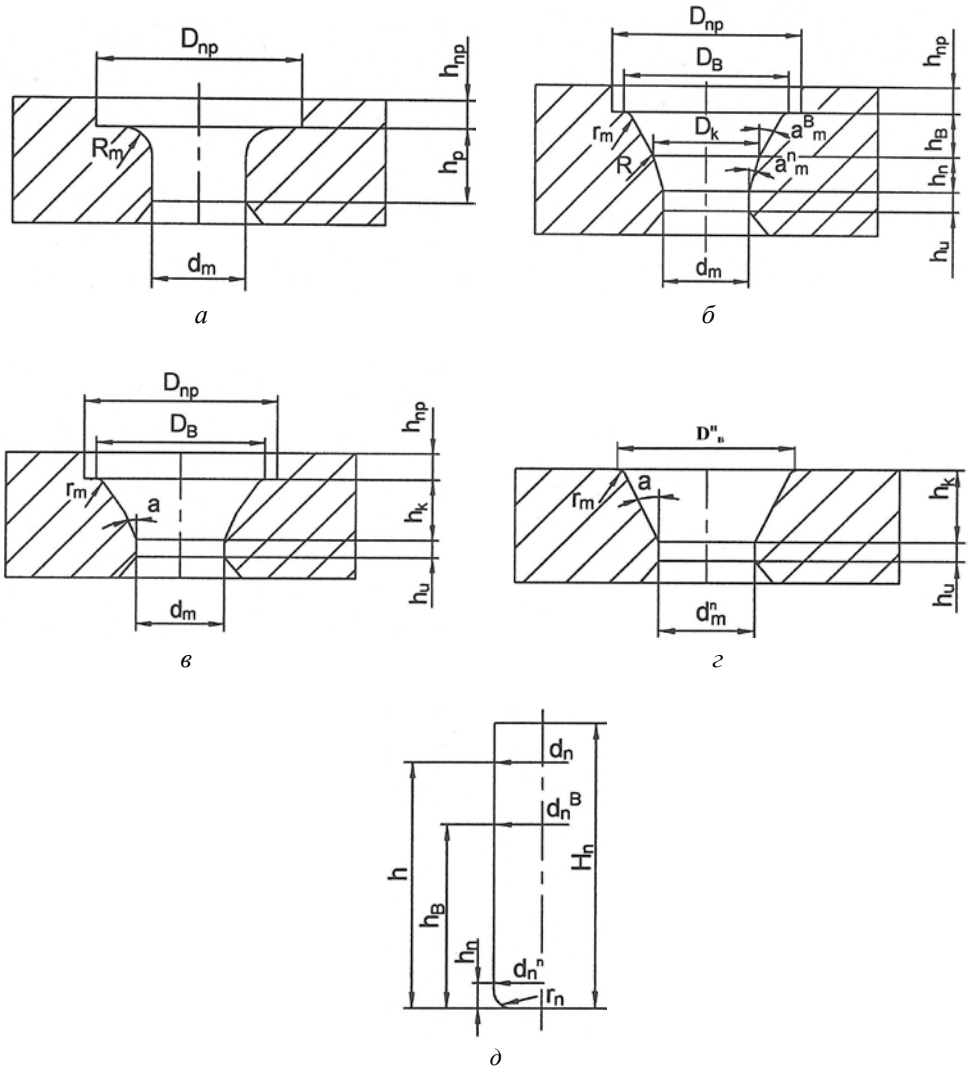


Рис. 9.10. Эскизы рабочего инструмента для комбинированной вытяжки плоской заготовки (свёртка): *а* – радиальная матрица; *б* – двухконусная матрица; *в* – одноконусная матрица; *г* – нижняя матрица; *д* – пуансон

Исходными данными для расчета исполнительных размеров служат результаты расчета размеров заготовок. Расчетные исполнительные размеры рабочего инструмента:

- диаметр приёмной части матрицы, $D_{пр.}$;
- высота приемной части матрицы, $h_{пр.}$;
- диаметр рабочего пояска матрицы, $d_м$;
- высота рабочего (цилиндрического) пояска матрицы, $h_ц$;
- радиус рабочей кромки матрицы, $R_м$;
- угол конусности верхней матрицы, $\alpha^{в}_{м}$;
- угол конусности нижней матрицы, $\alpha^{н}_{м}$;
- высота рабочей части матрицы, $h_р$;
- диаметр пуансона в верхнем сечении, $d^{в}_{п}$;
- диаметр пуансона в нижнем сечении, $d^{н}_{п}$;
- диаметр цилиндрической части пуансона, $d_ц$;
- радиус сопряжения боковой поверхности пуансона с торцом, $r_п$.

Порядок расчета исполнительных размеров рабочего инструмента для операции свёртка через одну и две матрицы приведен в табл. 9.5 и 9.6.

Т а б л и ц а 9.5

Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента для комбинированной вытяжки плоской заготовки через одну матрицу

Определяемая величина	Расчетная формула
1	2
Диаметр приемной части матрицы, $D_{пр.}$	$D_{пр.} = (D_0+\delta)^{+\delta}$
Высота приемной части матрицы, $h_{пр.}$	$h_{пр.} = (S_0)_{-\delta}$
Высота приемной части матрицы, если осуществляется вырубка, $h^{*}_{пр.}$	$h^{*}_{пр.} = (3{,}5\ldots4{,}0)(S_0)_{-\delta}$
Диаметр рабочего пояска матрицы, $d_м$	$d_м = (d_{св.}-И_и-\delta_у)^{+\delta}$
Наружный диаметр заготовки после свёртки, $d_{св.}$	(см. табл. 9.4)
Допуск на изготовление, δ	Назначается по $h8$
Припуск на износ матрицы, $И_и$	$И_и = \delta$
Упругая деформация полуфабриката, $\delta_у$	$\delta_у = (0{,}001\ldots0{,}003)d_{св}$
Высота рабочего цилиндрического пояска матрицы, $h_ц$	$h_ц = (0{,}05\ldots0{,}07)d_м$
Угол конусности матрицы (одноконусной), $\alpha_м$	$\alpha_м = 8^0\ldots18^0$
Высота рабочего конуса матрицы, $h_к$	$h_к = \frac{D_к - d_м}{2\cdot \mathrm{tg}\alpha}$
Для радиальной матрицы радиус рабочего профиля, $R_м$	$R_м = (6\ldots10)S_0$
Для двухконусной матрицы: угол верхнего конуса, $\alpha^{в}_{м}$ угол нижнего конуса, $\alpha^{н}_{м}$	 $\alpha^{в}_{м} = 30^0\ldots45^0$ $\alpha^{н}_{м} = 8^0\ldots18^0$
Радиус скругления кромки матрицы, $r_м$	$r_м = (2\ldots4)S_0$
Высота верхнего конуса матрицы, $h_в$	$h_в = \frac{D_в - D_к}{2\cdot \mathrm{tg}\alpha^{в}_{м}}$

Окончание табл. 9.5

1	2
Высота нижнего конуса матрицы, $h_н$	$h_н = \frac{D_к - d_м}{2 \cdot \mathrm{tg}\alpha^н_м}$
Диаметр верхнего конуса матрицы, $D_в$	$D_в = 0{,}9D_0$
Входной диаметр нижнего конуса матрицы, $D_к$	$D_к = (0{,}55…0{,}60)D_0\sqrt{1+m_d^2}$
Радиус сопряжения верхнего и нижнего конуса двухконусной матрицы, R	$R = \frac{D_0 - d_м}{3}$
Диаметр цилиндрической части пуансона, $d_п$	$d_п = d^в_п$
Диаметр пуансона в верхнем сечении, $d^в_п$	$d^в_п = (d^в_{вi}+П_и+\delta_п)_{-\delta п}$
Диаметр пуансона в нижнем сечении, $d^н_п$	$d^н_п = (d^н_{вi}+П_и+\delta_п)_{-\delta п}$
Припуск на износ пуансона, $П_и$	$П_и = \delta$
Допуск на неточность изготовления пуансона, $\delta_п$	Назначается по $h8$
Высота пуансона от торца до верхнего сечения, $h^в$ (см. табл. 9.4)	$h^в = h^в_i$
Высота пуансона до нижнего сечения, $h^н$ (см. табл. 9.4)	$h^н = h^н_i$
Радиус сопряжения боковой поверхности пуансона с торцом, $r_п$	$r_п = (0{,}10…0{,}12)d_п$

Т а б л и ц а 9.6

Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента для комбинированной вытяжки плоской заготовки через две матрицы

Определяемая величина	Расчетная формула
1	2
Диаметр приемной части верхней матрицы, $D_{пр}$	$D_{пр.} = (D_0+\delta)^{+\delta}$
Высота приемной части верхней матрицы, $h_{пр.}$	$h_{пр.} = (S_0)_{-\delta}$
Высота приемной части верхней матрицы, если осуществляется вырубка, $h^*_{пр.}$	$h^*_{пр.} = (3{,}5…4{,}0)(S_0)_{-\delta}$
Диаметр рабочего пояска верхней матрицы, $d_м$	$d_м = d_{св.}+2S_0(1–m_s)$
Наружный диаметр полуфабриката после свёртки, $d_{св.}$	(см. табл. 9.4)
Допуск на изготовление, δ	Назначается по $h8$
Высота рабочего цилиндрического пояска верхней матрицы, $h_ц$	$h_ц = (0{,}05…0{,}07)d_м$
Угол конусности верхней матрицы (одноконусной), $\alpha_м$	$\alpha_м = 8^0…18^0$
Для радиальной верхней матрицы радиус рабочего профиля, $R_м$	$R_м = (6…10)S_0$
Для двухконусной матрицы: угол верхнего конуса, $\alpha^в_м$ угол нижнего конуса, $\alpha^н_м$	 $\alpha^в_м = 30^0…45^0$ $\alpha^н_м = 8^0…18^0$
Радиус скругления кромки верхней матрицы, $r_м$	$r_м = (2…4)S_0$

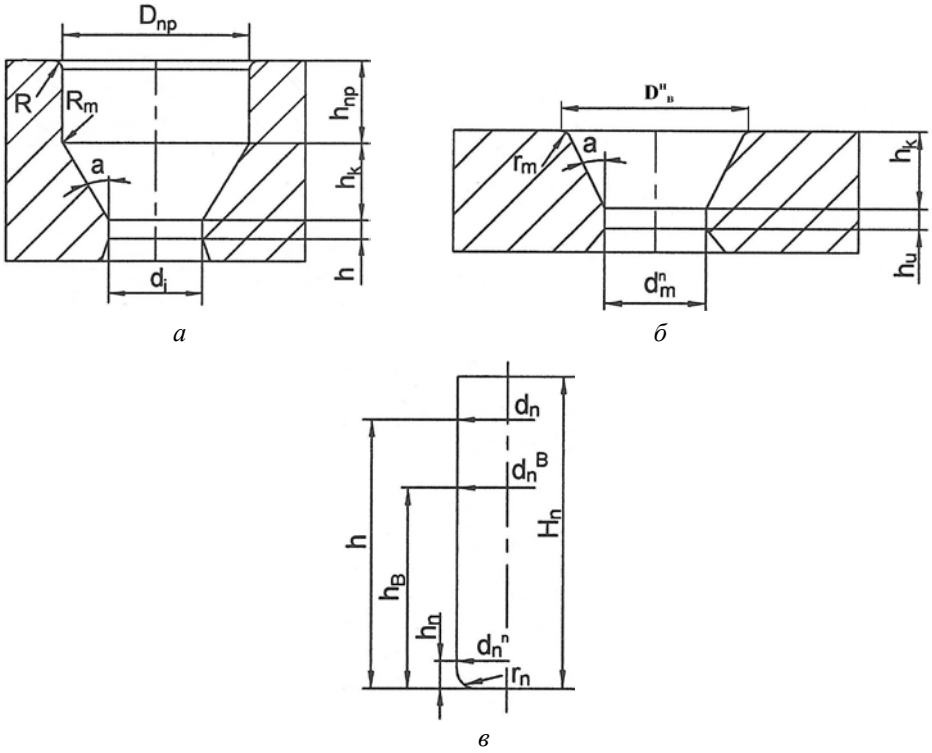
Окончание табл. 9.6

1	2
Высота верхнего конуса верхней матрицы, $h_в$	$h_в = \frac{D_в - D_к}{2 \cdot \mathrm{tg}\alpha^в_м}$
Высота нижнего конуса верхней матрицы, $h_н$	$h_н = \frac{D_к - d_м}{2 \cdot \mathrm{tg}\alpha^н_м}$
Диаметр верхнего конуса верхней матрицы, $D_в$	$D_в = 0{,}9D_0$
Высота рабочего конуса верхней матрицы, $h_к$	$h_к = \frac{D_к - d_м}{2 \cdot \mathrm{tg}\alpha_м}$
Входной диаметр нижнего конуса двухконусной матрицы, $D_к$	$D_к = (0{,}55\ldots0{,}60)D_0\sqrt{1+m_d^2}$
Радиус сопряжения верхнего и нижнего конуса двухконусной матрицы, R	$R = \frac{D_0 - d_м}{3}$
Диаметр рабочего пояска нижней матрицы, $d^н_м$	$d^н_м = (d_{св.} - П_и - \delta_у)^{+\delta}$
Допуск на изготовление, δ	Назначается по $h8$
Припуск на износ матрицы, $П_и$	$П_и = \delta$
Упругая деформация полуфабриката, $\delta_у$	$\delta_у = (0{,}001\ldots0{,}003)d_{св}$
Высота рабочего цилиндрического пояска верхней матрицы, $h^н_ц$	$h^н_ц = (0{,}05\ldots0{,}07)d^н_м$
Высота рабочего конуса нижней матрицы, $h^н_к$	$h^н_к = \frac{D^н_в - d^н_м}{2} \cdot \mathrm{ctg}\alpha^н_м$
Входной диаметр нижней матрицы, $D^в_н$	$D^в_н = (1{,}20\ldots1{,}40)d_i$
Угол конусности нижней матрицы, $\alpha^н_м$	$\alpha^н_м = 7^0\ldots15^0$
Радиус скругления кромки нижней матрицы, $r^н_м$	$r^н_м = (2\ldots4)S_0$
Диаметр цилиндрической части пуансона, $d_п$	$d_п = d^в_п$
Диаметр пуансона в верхнем сечении, $d^в_п$	$d^в_п = (d^в_{вi} + П_и + \delta_п)_{-\delta п}$
Диаметр пуансона в нижнем сечении, $d^н_п$	$d^н_п = (d^н_{вi} + П_и + \delta_п)_{-\delta п}$
Припуск на износ пуансона, $П_и$	$П_и = \delta$
Допуск на неточность изготовления пуансона, $\delta_п$	Назначается по $h8$
Высота пуансона от торца до верхнего сечения, $h^в$ (см. табл. 9.4)	$h^в = h^в_i$
Высота пуансона до нижнего сечения, $h^н$ (см. табл. 9.4)	$h^н = h^н_i$
Радиус сопряжения боковой поверхности пуансона с торцом, $r_п$	$r_п = (0{,}10\ldots0{,}12)d_п$

9.7.2. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента на последующих операциях комбинированной вытяжки

Последующие операции комбинированной вытяжки осуществляют через одну (рис. 9.11,*а*) и две (рис. 9.11,*а*,*б*) матрицы. Форма рабочей части матрицы (верхней – в случае вытяжки через две матрицы) состоит из приемной

части, рабочего конуса и цилиндрического пояска (рис. 9.11,*а*). Форма рабочей части нижней матрицы имеет рабочий конус и цилиндрический поясок (рис. 9.11,*б*).



а *б* *в*

Рис. 9.11. Эскизы рабочего инструмента для комбинированной вытяжки полой заготовки (последующие операции): *а* – верхняя матрица; *б* – нижняя матрица; *в* – пуансон

Расчетные исполнительные размеры рабочего инструмента:

- диаметр приёмной части матрицы, $D_{пр.}$;
- высота приемной части матрицы, $h_{пр.}$;
- диаметр рабочего пояска матрицы, $d_м$;
- высота рабочего (цилиндрического) пояска матрицы, $h_ц$;
- радиус рабочей кромки матрицы, $R_м$;
- угол конусности верхней матрицы, $\alpha^{в}_{м}$;
- угол конусности нижней матрицы, $\alpha^{н}_{м}$;
- высота рабочей части матрицы, $h_р$;
- диаметр пуансона в верхнем сечении, $d^{в}_{п}$;
- диаметр пуансона в нижнем сечении, $d^{н}_{п}$;
- диаметр цилиндрической части пуансона, $d_ц$;
- радиус сопряжения боковой поверхности пуансона с торцом, $r_п$.

Порядок расчета исполнительных размеров рабочего инструмента для последующих операций вытяжки через одну и две матрицы приведен в табл. 9.7 и 9.8.

Т а б л и ц а 9.7

Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента для последующих операций вытяжки через одну матрицу

Определяемая величина	Расчетная формула
Диаметр приемной части матрицы, $D_{пр}$	$D_{пр.} = (d_{i-1}+\delta)^{+\delta}$
Высота приемной части матрицы, $h_{пр.}$	$h_{пр} = \frac{d_{мi-1}}{2}$
Диаметр рабочего пояска матрицы, $d_м$	$d_м = (d_{i.}-П_и-\delta_у)^{+\delta}$
Наружный диаметр полуфабриката после вытяжки, d_i	(см. табл. 9.4)
Допуск на изготовление, δ	Назначается по *h*8
Припуск на износ матрицы, $П_и$	$П_и = \delta$
Упругая деформация полуфабриката, $\delta_у$	$\delta_у = (0{,}001\ldots0{,}003)d_i$
Высота рабочего цилиндрического пояска матрицы, $h_ц$	$h_ц = (0{,}05\ldots0{,}15)d_м$
Высота рабочего конуса матрицы, $h_к$	$h_к = \frac{D_{пр}-d_м}{2}\cdot \mathrm{ctg}\alpha_м$
Радиус сопряжения приемной и конической частей, $R_м$	$R_м = (2\ldots4)S_0$
Радиус скругления кромки приемной части матрицы, $r_м$	$r_м = (2\ldots4)S_0$
Угол конусности матрицы, $\alpha_м$	$\alpha_м = 10^0\ldots30^0$
Диаметр цилиндрической части пуансона, $d_п$	$d_п = d^в_п$
Диаметр пуансона в верхнем сечении, $d^в_п$	$d^в_п = (d^в_{вi}+П_и+\delta_п)_{-\delta п}$
Диаметр пуансона в нижнем сечении, $d^н_п$	$d^н_п = (d^н_{вi}+П_и+\delta_п)_{-\delta п}$
Высота рабочей части пуансона, *h*	$H = H_i-S_д$
Высота полуфабриката, H_i	см. табл. 2.5
Толщина дня полуфабриката, $S_д$	см. табл. 2.5
Припуск на износ пуансона, $П_и$	$П_и = \delta$
Допуск на неточность изготовления пуансона, $\delta_п$	Назначается по *h*8
Высота пуансона от торца до верхнего сечения, $h^в$ (см. табл. 9.4)	$h^в = h^в_i$
Высота пуансона до нижнего сечения, $h^н$ (см. табл. 9.4)	$h^н = h^н_i$
Радиус сопряжения боковой поверхности пуансона с торцом, $r_п$	$r_п = (0{,}10\ldots0{,}12)d_п$

Таблица 9.8

Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента для последующих операций вытяжки через две матрицы

Определяемая величина	Расчетная формула
Диаметр приемной части верхней матрицы, $D_{пр.}$	$D_{пр.} = (d_{i-1}+\delta)^{+\delta}$
Высота приемной части верхней матрицы, $h_{пр.}$	$h_{пр} = \frac{d_{мi-1}}{2}$
Диаметр рабочего пояска верхней матрицы, $d_м$	$d_м = d_i+2S_0(1-m_s)$
Высота рабочего цилиндрического пояска верхней матрицы, $h^н_ц$	$h^н_ц = (0{,}05…0{,}15)d^н_м$
Наружный диаметр полуфабриката после вытяжки, d_i	(см. табл. 9.4)
Допуск на изготовление, δ	Назначается по *h*8
Высота рабочего конуса верхней матрицы, $h_к$	$h_к = \frac{D_{пр} - d_м}{2} \cdot \mathrm{ctg}\alpha^в_м$
Радиус сопряжения приемной и конической частей, $R_м$	$R_м = (2…4)S_0$
Высота рабочего цилиндрического пояска верхней матрицы, $h_ц$	$h_ц = (0{,}05…0{,}15)d_м$
Угол конусности верхней матрицы (одноконусной), $\alpha^в_м$	$\alpha^в_м = 10^0…30^0$
Радиус скругления верхней матрицы, $r_м$	$r_м = (2…4)S_0$
Диаметр рабочего пояска нижней матрицы, $d^н_м$	$d^н_м = (d_i-П_и-\delta_у)^{+\delta}$
Допуск на изготовление, δ	Назначается по *h*8
Припуск на износ матрицы, $П_и$	$П_и = \delta$
Упругая деформация полуфабриката, $\delta_у$	$\delta_у = (0{,}001…0{,}003)d_{св}$
Высота рабочего конуса матрицы, $h_к$	$h_к = \frac{D_{пр} - d_м}{2} \cdot \mathrm{ctg}\alpha_м$
Входной диаметр нижней матрицы, $D^в_н$	$D^в_н = (1{,}20…1{,}40)d_i$
Угол конусности нижней матрицы, $\alpha^н_м$	$\alpha^н_м = 7^0…15^0$
Радиус скругления кромки нижней матрицы, $r^н_м$	$r^н_м = (2…4)S_0$
Диаметр цилиндрической части пуансона, $d_п$	$d_п = d^в_п$
Диаметр пуансона в верхнем сечении, $d^в_п$	$d^в_п = (d^в_{вi}+П_и+\delta_п)_{-\delta п}$
Диаметр пуансона в нижнем сечении, $d^н_п$	$d^н_п = (d^н_{вi}+П_и+\delta_п)_{-\delta п}$
Высота рабочей части пуансона, *h*	$h = H_i-S_д$
Высота полуфабриката, H_i	см. табл. 2.5
Толщина дна полуфабриката, $S_д$	см. табл. 2.5
Припуск на износ пуансона, $П_и$	$П_и = \delta$
Допуск на неточность изготовления пуансона, $\delta_п$	Назначается по *h*8
Высота пуансона от торца до верхнего сечения, $h^в$ (см. табл. 9.4)	$h^в = h^в_i$
Высота пуансона до нижнего сечения, $h^н$ (см. табл. 9.4)	$h^н = h^н_i$
Радиус сопряжения боковой поверхности пуансона с торцом, $r_п$	$r_п = (0{,}10…0{,}12)d_п$

9.8. Расчёт технологических усилий на комбинированной вытяжке

Максимальное технологическое усилие на комбинированной вытяжке, действующее в выходном сечении стенки, рассчитывается по формуле

$$P_{\max} = P_{\text{с}} + P_{\text{т}}, \tag{9.6}$$

где $P_{\text{с}}$ – сила, зависящая от растягивающих напряжений σ_z, действующих в опасном сечении полуфабриката; P_m – сила, затрачиваемая на преодоление трения материала по пуансону в пределах зоны утонения стенки;

$$P_{\text{с}} = \pi \cdot d_{\text{ср}} \cdot S \cdot 1{,}15 \cdot \sigma_i \cdot \left\{ \left[1 + \frac{\mu_{\text{м}}}{\sin\alpha} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_\rho}{1{,}15 \cdot \sigma_i} \right) - \frac{\mu_{\text{п}} + \mu_{\text{м}}}{2 \cdot \sin\alpha} \cdot \ln\frac{1}{m_s} \right] \cdot \ln\frac{1}{m_s} + \frac{\sigma_\rho}{1{,}15 \cdot \sigma_i} + \frac{\sin\alpha}{2} \right\}, \tag{9.7}$$

где $\sigma_i = \sigma_{\text{в}} \cdot \left(\frac{1 - m_d \cdot m_s}{\psi_y} \right)^{\frac{\psi_y}{1-\psi_y}}$, ψ_y – относительное равномерное сужение образца при испытании его на растяжение; $\mu_{\text{м}}$, $\mu_{\text{п}}$ – коэффициенты трения по матрице и пуансону соответственно. В расчетах принимают $\mu_{\text{м}} = \mu_{\text{п}} = 0{,}10\ldots0{,}12$ – для латунных и биметаллических заготовок, $\mu_{\text{м}} = \mu_{\text{п}} = 0{,}14\ldots0{,}16$ – для стальных заготовок; α – угол конусности матрицы; $\alpha = \alpha_{\text{н}}$ – для двухконусной матрицы; $\alpha = \arccos\frac{R_{\text{м}} + S_i}{R_{\text{м}} + S_{i-1}}$ – для радиальной матрицы.

При вытяжке через две матрицы угол α принимается равным углу конусности нижней матрицы: $\alpha = \alpha_{\text{н}}$.

Напряжения противонатяжения σ_ρ рассчитывают по формулам:

- для первой операции вытяжки плоской заготовки в радиальной матрице

$$\sigma_\rho = 1{,}1 \cdot \sigma_i' \cdot \left(\ln\frac{1}{m_d} + \frac{S_0}{4 \cdot R_{\text{м}}} \right) \cdot (1 + 1{,}5 \cdot \mu_{\text{м}}); \tag{9.8}$$

- для первой операции вытяжки плоской заготовки в одноконусной матрице

$$\sigma_\rho = 1{,}1 \cdot \sigma_i' \cdot (1 + \mu_{\text{м}} \cdot \text{ctg}\alpha) \cdot \ln\frac{1}{m_d}; \tag{9.9}$$

• для первой операции вытяжки плоской заготовки в двухконусной матрице

$$\sigma_\rho = 1{,}1 \cdot \sigma_i^{'} \cdot \left[(1 + \mu_п \cdot \mathrm{ctg}\alpha_в) \cdot \left(\ln\frac{D_0}{D_к} - \frac{D_0 - D_к}{D_0} \right) + \frac{S_0}{2 \cdot R_к \cdot \sqrt{\frac{D_к}{D_0}}} \right] \times \times \left(1 + \mu_м \cdot \varphi + \ln\frac{D_0}{D_к} \right), \quad (9.10)$$

где $\sigma_i^{'} = \frac{\sigma_в}{1-\psi_y} \left(\frac{1-m_d}{\psi_y} \right)^{\frac{\psi_y}{1-\psi_y}}$; $R_м$ – радиус рабочей кромки матрицы; $R_к$ – радиус сопряжения верхнего и нижнего конуса двухконусной матрицы; D_0 – диаметр заготовки; $D_к$ – диаметр сечения сопряжения верхнего и нижнего конусов двухконусной матрицы; $\alpha_в$ – угол верхнего конуса двухконусной матрицы; $\varphi = \frac{\alpha_в - \alpha_н}{2}$ (рад.);

• для последующей операции вытяжки полой заготовки

$$\sigma_\rho = 1{,}1 \cdot \sigma_i^{'} \cdot \left[\left(1 + \frac{\mu_м}{\mathrm{tg}\alpha} \right) \cdot \ln\frac{1}{m_{d_i}} + 0{,}66 \cdot \sin\alpha \cdot \sqrt{\frac{S_{i-1}}{d_{i-1}}} \right], \quad (9.11)$$

где $m_{d_i} = \frac{d_i}{d_{i-1}}$ – коэффициент вытяжки на данной операции; d_{i-1}, S_{i-1} – диаметр и толщина боковой стенки заготовки перед вытяжкой.

Величина усилия на преодоление трения по пуансону в пределах зоны утонения определяется выражением:

$$P_т = 1{,}15 \cdot \mu_п \cdot \sigma_i \cdot \frac{\pi \cdot d_i \cdot S_i}{\sin\alpha} \cdot \left[\ln\frac{1}{m_{s_i}} - \frac{\sigma_\rho}{1{,}15 \cdot \sigma_i} \cdot \left(\frac{1}{m_{s_i}} - 1 \right) \right]; \quad (9.12)$$

где $m_{s_i} = \frac{S_i}{S_{i-1}}$ – коэффициент утонения стенки на данной операции.

Величина максимального технологического усилия служит для выбора оборудования и оценки несущей способности рабочего инструмента.

9.9. Пример расчета технологических параметров комбинированной вытяжки

В качестве примера рассмотрена возможность изготовления оболочки комбинированной вытяжкой (рис. 9.12). Отличительной особенностью оболочки является то, что после сборки вершина пули открыта. Монтаж пули осуществляется путем размещения элементов через открытую часть с последующим обжимом оживальной части. Хвостовая часть оболочки формируется до проведения монтажных операций. Материал оболочки – биметалл-3, S_0 = 1,37мм.

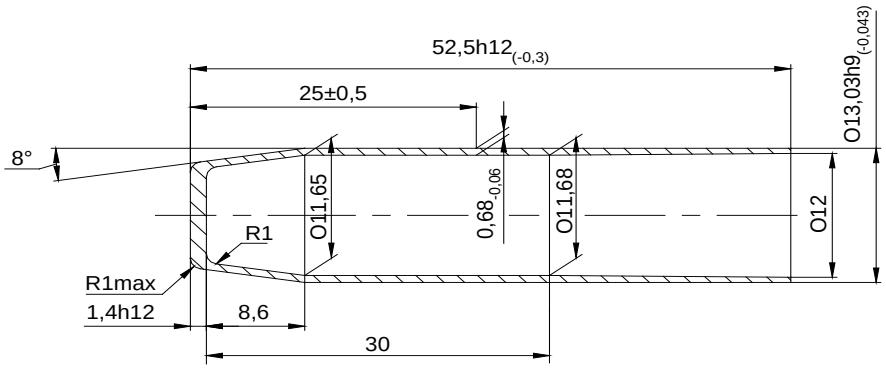


Рис. 9.12.Чертеж цилиндрической оболочки

9.9.1. Определение размеров расчетной детали и оценка возможности её изготовления комбинированной вытяжкой

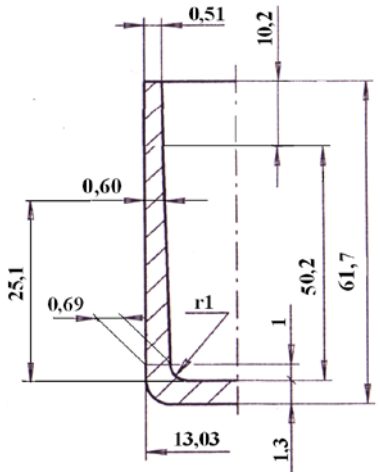


Рис. 9.13. Расчетная деталь

Порядок расчета, формулы и результаты для определения размеров расчетной детали приведены в табл. 9.9.

Таблица 9.9

Определение размеров расчетной детали

Определяемая величина	Расчетная формула	Значение
Расчетный наружный диаметр корпуса, $d_к$	$d_к = d$	13,03
Расчетная толщина стенки в в.р.с., $S_к^в$	$S_к^в = S^в$	0,51
Толщина стенки детали в в.р.с., $S^в$	Определяется по чертежу детали	0,51
Расчетная толщина стенки в н.р.с., $S_к^н$	$S_к^н = S^н$	0,69
Толщина стенки детали в н.р.с., $S^н$	Определяется по чертежу детали	0,69
Расчетная толщина стенки в с.р.с., $S_к^c$	$S_к^c = S^c$	0,60
Толщина стенки детали в с.р.с., S^c	Определяется по чертежу детали	0,60
Расчетная толщина дна, $(S_д)_к$	$(S_д)_к=(0,97)S_л$	1,30
Толщина исходной листовой заготовки, $S_л$	Биметалл-3, $S_л$ = 1,37 мм	1,37
Расчетный внутренний радиус сопряжения корпуса с дном, $r_к$	$r_к = r$	1,0
Расстояние от дна до н.р.с., $h_к^н$	$h_к^н = r_к$	1,0
Расстояние от дна до с.р.с., $h_к^c$	$h_к^c = h_c$	25,10
Расстояние от дна до с.р.с., h_c	Определяется по чертежу детали	25,10
Расстояние от дна до в.р.с., $h_к^в$	$h_к^в = H_к – S_д$	50,20
Расстояние от дна до в.р.с., $h^в$	Определяется по чертежу детали	51,20
Расчетная высота детали с учетом припуска на обрезку, $h_к$	$h_к = h_к^в+(S_д)_к+h_{обр.}$	61,70
Припуск на обрезку, $h_{обр.}$	$h_{обр} = \frac{(0,10...0,15)\cdot V_{дет}}{\pi\cdot(d_к - S_к^в)\cdot S_к^в}$	10,22

9.9.2. Определение количества операций и назначение степеней деформации

Суммарный коэффициент вытяжки:

$m_{d\Sigma} = d_{кср.}/D_0$;

$d_{кср.} = d_к – S^в_к$, $d_{кср\ .}$=1 3,03–0,51 = 12,52 мм;

$m_{d\Sigma}$ = 12,52/39,23 = 0,3191;

$m_{s\Sigma} = S^в_к/S_0$;

$m_{s\Sigma}$ = 0,51/1,3 = 0,3923;

Проверяем возможность изготовления детали за одну операцию – свёртку.

Так как $m_{d\Sigma}$ = 0,3191 и $\kappa\cdot m_{d\text{пред.}}$ = 0,55, то $m_{d\Sigma} < \kappa\cdot m_{d\text{пред.}}$, $m_{s\Sigma}$ = 0,3923 и $\kappa\cdot m_{s\text{пред.}}$ = 0,88, то $m_{s\Sigma} < \kappa\cdot m_{s\text{пред.}}$.

Следовательно, за одну операцию деталь изготовить нельзя. Проверяем возможность изготовления детали за две операции. Принимаем

$$m_{d\text{св}} = \kappa \cdot m_{d\text{пред.}},\ \ m_{d\text{св}} = 0{,}55;$$

$$m_{s\text{св}} = \kappa \cdot m_{s\text{пред.}},\ \ m_{s\text{св}} = 0{,}88.$$

Тогда на первой вытяжке:

$$m_{d1} = m_{d\Sigma}/m_{d\text{св}},\ \ m_{d1} = 0{,}3191/0{,}55 = 0{,}5802;$$

$$m_{s1} = m_{s\Sigma}/m_{s\text{св}},\ \ m_{s1} = 0{,}3923/0{,}88 = 0{,}4458.$$

Так как $m_{d1} < \kappa \cdot m_{d\text{пред.}}$, $m_{s1} < \kappa \cdot m_{s\text{пред}}$, то проверяем возможность изготовления детали за три операции:

$$m_{d1} = m_{d2} = \sqrt{\frac{m_{d\Sigma}}{m_{d\text{св}}}},\quad m_{d1} = m_{d2} = \sqrt{\frac{0{,}3191}{0{,}55}} = 0{,}7617;$$

$$m_{s1} = m_{s2} = \sqrt{\frac{m_{s\Sigma}}{m_{s\text{св}}}},\quad m_{s1} = m_{s2} = \sqrt{\frac{0{,}3923}{0{,}88}} = 0{,}6677.$$

Так как $m_{d1} = m_{d2} < \kappa \cdot m_{d\text{пред.}}$ и $m_{s1} = m_{s2} > \kappa \cdot m_{s\text{пред.}}$, следовательно, за три операции деталь изготовить нельзя. Проверяем возможность изготовления детали за четыре операции:

$$m_{d1} = m_{d2} = m_{d3} = \sqrt[3]{\frac{0{,}3191}{0{,}55}} = 0{,}8340;$$

$$m_{s1} = m_{s2} = m_{s3} = \sqrt[3]{\frac{0{,}3923}{0{,}88}} = 0{,}7639.$$

Так как $m_{d1} = m_{d2} = m_{d3} > \kappa \cdot m_{d\text{пред.}}$ и $m_{s1} = m_{s2} = m_{s3} > \kappa \cdot m_{s\text{пред.}}$, следовательно, деталь можно изготовить за четыре операции – свёртку и три вытяжки.

Устанавливаем возможность обеспечения заданных механических свойств на последней операции. Так как $e_{in} = e_{i\text{ф}} = 0{,}50$, то заданные механические свойства обеспечены.

Проверяем выполнение тождества:

$$m_{d\Sigma} = m_{d\text{св.}} \cdot m_{d1} \cdot m_{d2} \cdot m_{d3},$$

$$m_{s\Sigma} = m_{s\text{св.}} \cdot m_{s1} \cdot m_{s2} \cdot m_{s3},$$

$$0{,}3191 = 0{,}3191;$$

$$0{,}3923 = 0{,}3923.$$

9.9.3. Определение формы и размеров заготовок после операции вытяжки

Последовательность расчета и расчетные формулы приведены в табл. 9.10.

Т а б л и ц а 9.10

Определение размеров полуфабрикатов после каждой операции вытяжки

Определяемая величина	Расчетная формула	Значение, мм			
		свёртка	1-я вытяжка	2-я вытяжка	3-я вытяжка
Средний диаметр полуфабриката, $d_{ср.}$ после свёртки после последующей вытяжки	$d_{ср} = D_0 \cdot m_{dсв}$ $d_{ср.i} = d_{ср.i-1} \cdot m_{di}$	21,576	17,995	15,008	12,516
Наружный диаметр полуфабриката на i-ой операции, d_i	$d_{нi} = d_{ср.i} + S_i^{в}$	22,721	18,869	15,675	13,026
Толщина стенки полуфабриката в в.р.с., $S_i^{в}$ после свёртки после последующей вытяжки	$S_i^{в} = S_0 \cdot m_{sсв}$ $S_i^{в} = S_{i-1}^{в} \cdot m_{si}$	1,144	0,874	0,668	0,510
Толщина стенки заготовки в н.р.с., $S_{iн}$ Размеры: $S^{н}_{к}$, $S_{вк}$ для расчётной детали	$S_i^{н} = S_i^{в} + \left(S_к^{н} - S_к^{в}\right)$	1,324	1,054	0,848	0,690
Толщина дна полуфабриката, $S_{дн.i}$	$S_{дн.i} = S_0$	1,3			
Высота полуфабриката на i-й операции, H_i	$H_i = \frac{\left(D_0^2 - d_i^2\right) \cdot S_0}{4 \cdot d_{ср.i} \cdot S_{iср}} + S_д$	13,784	23,465	38,269	60,563
Внутренний диаметр полуфабриката в в.р.с. на i-й операции, $d^{в}_{вi}$	$d_{вi}^{в} = d_i - 2S_i^{в}$	20,433	17,121	14,340	12,006
Внутренний диаметр полуфабриката в н.р.с. на i-й операции, $d^{н}_{вi}$	$d_{вi}^{н} = d_i - 2S_i^{н}$	20,073	16,761	13,980	11,646
Радиус сопряжения внутренней поверхности дна со стенкой, r_i	$r_i = 0{,}1 \cdot d_{нi}$	2,272	1,887	1,568	1,303
Расстояние н.р.с. от внутренней поверхности дна на i-й операции, $h^{н}{}_i$	$h_i^{н} = r_i$	2,272	1,887	1,568	1,303
Расстояние в.р.с. от внутренней поверхности дна на i-й операции, $h^{в}{}_i$	$h_i^{в} = H_i - S_д - \frac{\Delta V}{\pi \cdot d_{ср.i} \cdot S_i^{в}}$	9,843	18,019	30,461	Принимаем $h^{в}{}_i$ = =49,05
Объем припуска на обрезку, ΔV, мм^3	$\Delta V = 0{,}15 \cdot V_{дет}$	204,826			

9.9.4. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента

Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента для операции свёртка через две матрицы приведен в табл. 9.11.

Таблица 9.11

Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента для комбинированной вытяжки плоской заготовки через две матрицы

Определяемая величина	Расчетная формула	Значение, мм
Диаметр приемной части верхней матрицы, $D_{пр}$	$D_{пр} = (D_0+\delta)^{+\delta}$	$39{,}26^{+0{,}03}$
Высота приемной части верхней матрицы, $h_{пр.}$	$h_{пр.} = (S_0)_{-\delta}$	$1{,}30_{-0{,}03}$
Высота приемной части верхней матрицы, если осуществляется вырубка, $h^{*}_{пр.}$	$h^{*}_{пр.} = 4{,}0(S_0)_{-\delta}$	$5{,}2_{-0{,}03}$
Диаметр рабочего пояска верхней матрицы, $d_м$	$d_м = d_{св.}+2S_0(1-m_s)$	23,033
Наружный диаметр полуфабриката после свёртки, $d_{св.}$	(см. табл. 9.10)	22,721
Допуск на изготовление, δ	Назначается по *h*8	0,03
Высота рабочего цилиндрического пояска верхней матрицы, $h_ц$	$h_ц = 0{,}07d_м$	1,612
Для радиальной верхней матрицы радиус рабочего профиля, $R_м$	$R_м = 10S_0$	13,0
Диаметр рабочего пояска нижней матрицы, $d^{н}_{м}$	$d^{н}_{м} = (d_{св.}-П_и-\delta_у)^{+\delta}$	$22{,}623^{+0{,}03}$
Допуск на изготовление, δ	Назначается по *h*8	0,03
Припуск на износ матрицы, $П_и$	$П_и = \delta$	0,03
Упругая деформация полуфабриката, $\delta_у$	$\delta_у = 0{,}003d_{св}$	0,068
Высота рабочего цилиндрического пояска верхней матрицы, $h^{н}_{ц}$	$h^{н}_{ц} = 0{,}07d^{н}_{м}$	1,584
Угол конусности нижней матрицы, $\alpha^{н}_{м}$	$\alpha^{н}_{м} = 15^0$	Принимаем $\alpha^{н}_{м} = 15^0$
Радиус скругления кромки нижней матрицы, $r^{н}_{м}$	$r^{н}_{м} = 4S_0$	5,2
Диаметр цилиндрической части пуансона, $d_п$	$d_п = d^{в}_{п}$	$20{,}493_{-0{,}03}$
Диаметр пуансона в верхнем сечении, $d^{в}_{п}$	$d^{в}_{п} = (d^{в}_{всв.}+П_и+\delta_п)_{-\delta п}$	$20{,}493_{-0{,}03}$
Диаметр пуансона в нижнем сечении, $d^{н}_{п}$	$d^{н}_{п} = (d^{н}_{всв.}+П_и+\delta_п)_{-\delta п}$	$20{,}133_{-0{,}03}$
Припуск на износ пуансона, $П_и$	$П_и = \delta$	0,03
Допуск на неточность изготовления пуансона, $\delta_п$	Назначается по *h*8	0,03
Высота пуансона от торца до верхнего сечения, $h^{в}$	$h^{в} = h^{в}_{св.}$	9,843
Высота пуансона в нижнем сечении, $h^{н}$	$h^{н} = h^{н}_{св.}$	2,272
Радиус сопряжения боковой поверхности пуансона с торцом, $r_п$	$r_п = 0{,}12d_п$	2,459

Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента для последующих операций вытяжки через две матрицы приведен в табл. 9.12.

Таблица 9.12

Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента для последующих операций вытяжки через две матрицы

Определяемая величина	Расчетная формула	Значение, мм		
		1-я вытяжка	2-я вытяжка	3-я вытяжка
Диаметр приемной части верхней матрицы, $D_{пр}$	$D_{пр} = (d_{i-1}+\delta)^{+\delta}$	$22{,}751^{+0{,}03}$	$18{,}899^{+0{,}03}$	$15{,}705^{+0{,}03}$
Высота приемной части верхней матрицы, $h_{пр.}$	$h_{пр} = \frac{d_{мi-1}}{2}$	11,311	9,711	8,144
Диаметр рабочего пояска верхней матрицы, $d_м$	$d_м = d_i+2S_0(1-m_s)$	19,423	16,289	13,640
Наружный диаметр полуфабриката после вытяжки, d_i	(см. табл. 9.10)	18,869	15,675	13,026
Высота рабочего цилиндрического пояска верхней матрицы, $h^н_ц$	$h^н_ц = 0{,}15d^н_м$	2,817	2,369	1,943
Допуск на изготовление, δ	Назначается по *h*8	0,03		
Высота рабочего цилиндрического пояска верхней матрицы, $h_ц$	$h_ц = 0{,}15d_м$	2,913	2,443	2,046
Диаметр рабочего пояска нижней матрицы, $d^н_м$	$d^н_м = (d_i-П_и-\delta_у)^{+\delta}$	$18{,}782^{+0{,}03}$	$15{,}792^{+0{,}03}$	$12{,}957^{+0{,}03}$
Допуск на изготовление, δ	Назначается по *h*8	0,03		
Припуск на износ матрицы, $П_и$	$П_и = \delta$	0,03		
Упругая деформация полуфабриката, $\delta_у$	$\delta_у = 0{,}003d_i$	0,057	0,047	0,039
Угол конусности нижней матрицы, $\alpha^н_м$	$\alpha^н_м = 15^0$	15^0		
Диаметр цилиндрической части пуансона, $d_п$	$d_п = d^в_п$	$17{,}181_{-0{,}03}$	$14{,}400_{-0{,}03}$	$12{,}066_{-0{,}03}$
Диаметр пуансона в верхнем сечении, $d^в_п$	$d^в_п = (d^в_{вi}+П_и+\delta_п)_{-\delta п}$	$17{,}181_{-0{,}03}$	$14{,}400_{-0{,}03}$	$12{,}066_{-0{,}03}$
Диаметр пуансона в нижнем сечении, $d^н_п$	$d^н_п = (d^н_{вi}+П_и+\delta_п)_{-\delta п}$	$16{,}821_{-0{,}03}$	$14{,}040_{-0{,}03}$	$11{,}706_{-0{,}03}$
Припуск на износ пуансона, $П_и$	$П_и = \delta$	0,03		
Допуск на неточность изготовления пуансона, $\delta_п$	Назначается по *h*8	0,03		
Высота пуансона в верхнем сечении, $h_в$ (см. табл. 2.5)	$h_в = h_{вi}$	18,019	30,461	49,048
Высота пуансона в нижнем сечении, (см. табл. 2.5)	$h_н = h_{нi}$	1,887	1,568	1,303
Радиус сопряжения боковой поверхности пуансона с торцом, $r_п$	$r_п = 0{,}12d_п$	2,062	1,728	1,448

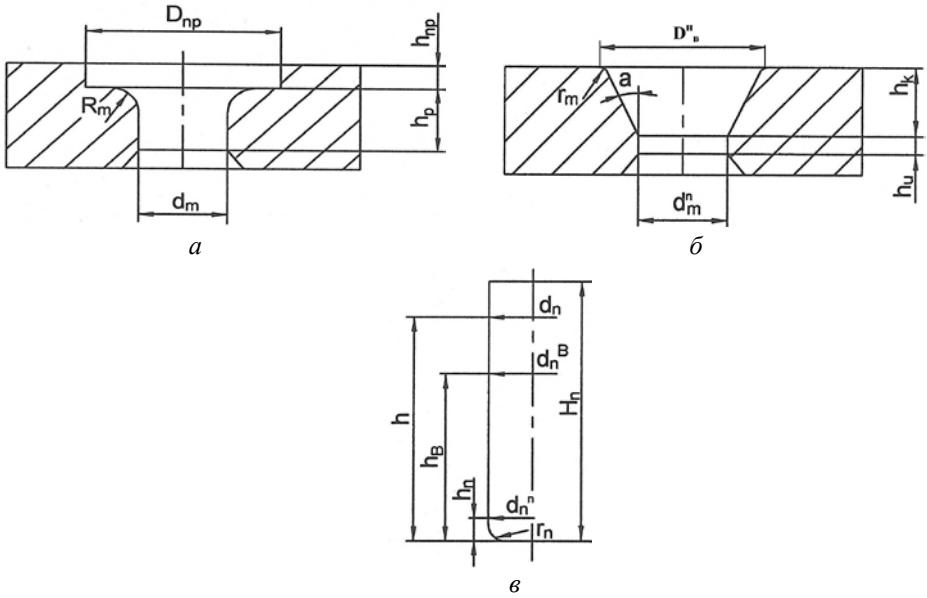


Рис. 9.16. Эскизы рабочего инструмента для комбинированной вытяжки плоской заготовки (свёртка): *а* – радиальная матрица; *б* – нижняя матрица; *в* – пуансон

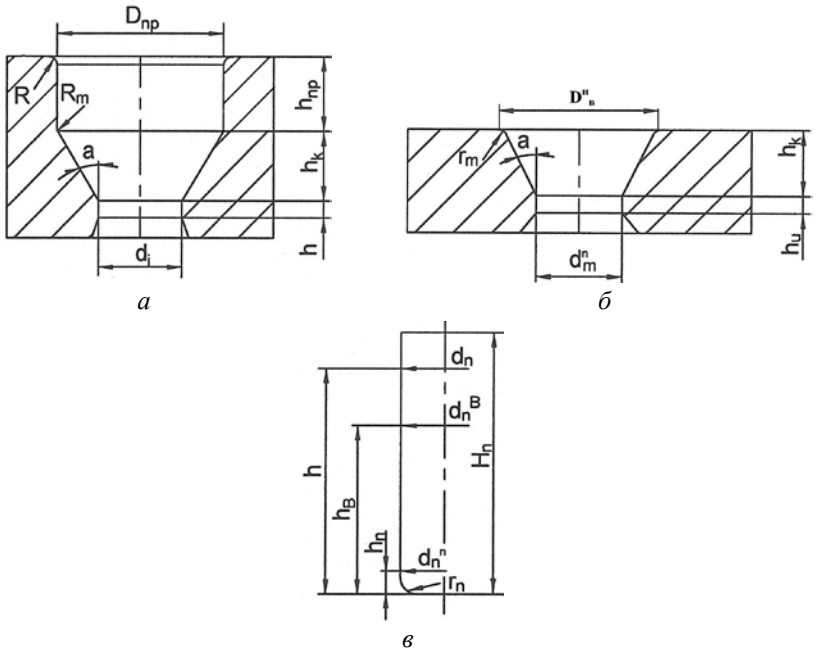


Рис. 9.17. Эскизы рабочего инструмента для комбинированной вытяжки плоской заготовки (последующие операции): *а* – матрица; *б* – нижняя матрица; *в* – пуансон

9.9.5. Расчёт технологических усилий

Исходные данные: S_0 = 1,30 мм; $R_м$ = 13,0 мм; $\alpha = \alpha_н = 15^0$; $\mu_м = \mu_п$ = 0,10; ψ_y = 0,27; $\sigma_в$ = 359 МПа.

Напряжение противонатяжения σ_ρ:

- для первой операции вытяжки плоской заготовки в радиальной матрице

$$\sigma_\rho = 1{,}1 \cdot \sigma_i' \cdot \left(\ln \frac{1}{m_d} + \frac{S_0}{4 \cdot R_м} \right) \cdot (1 + 1{,}5 \cdot \mu_м);$$

- для последующих операций вытяжки полой заготовки

$$\sigma_\rho = 1{,}1 \cdot \sigma_i' \cdot \left[\left(1 + \frac{\mu_м}{\mathrm{tg}\alpha} \right) \cdot \ln \frac{1}{m_{d_i}} + 0{,}66 \cdot \sin\alpha \cdot \sqrt{\frac{S_{i-1}}{d_{i-1}}} \right],$$

$$\sigma_i' = \frac{\sigma_в}{1 - \psi_y} \left(\frac{1 - m_d}{\psi_y} \right)^{\frac{\psi_y}{1-\psi_y}}.$$

Величина усилия на преодоление трения по пуансону в пределах зоны утонения:

$$P = 1{,}15 \cdot \mu_п \cdot \sigma_i \cdot \frac{\pi \cdot d_i \cdot S_i}{\sin\alpha} \cdot \left[\ln \frac{1}{m_{s_i}} - \frac{\sigma_\rho}{1{,}15 \cdot \sigma_i} \cdot \left(\frac{1}{m_{s_i}} - 1 \right) \right];$$

- для первой операции вытяжки (свёртки) плоской заготовки в радиальной матрице

$$P_с = \pi \cdot d_{ср} \cdot S \cdot 1{,}15 \cdot \sigma_i \cdot \left\{ \left[1 + \frac{\mu_м}{\sin\alpha} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_\rho}{1{,}15 \cdot \sigma_i} \right) - \frac{\mu_п - \mu_м}{2 \cdot \sin\alpha} \cdot \ln \frac{1}{m_s} \right] \cdot \ln \frac{1}{m_s} + \frac{\sigma_\rho}{1{,}15 \cdot \sigma_i} + \frac{\sin\alpha}{2} \right\},$$

где $\sigma_i = \sigma_в \cdot \left(\frac{1 - m_d \cdot m_s}{\psi_y} \right)^{\frac{\psi_y}{1-\psi_y}}$.

Максимальное технологическое усилие на комбинированной вытяжке, действующее в выходном сечении стенки равно: $P_{max} = P_{с.} + P_т$.

Результаты расчета усилий для первой и последующих операций вытяжки приведен в табл. 9.13.

Таблица 9.13

Расчет усилий для первой и последующих операций вытяжки

Операции	m_d	m_s	S	$d_{ср}$	σ_i	σ_i'	$\sigma_р$	$P_с$	$P_т$	P_{max}
			мм		МПа			Н		
Свёртка	0,550	0,880	1,144	21,576	456	594	323	25550	514	26060
Первая вытяжка	0,8340	0,7639	0,874	17,995	400	411	117	19670	671	20340
Вторая вытяжка	0,8340	0,7639	0,668	15,008	400	411	115	12540	428	12970
Третья вытяжка	0,8340	0,7639	0,510	12,516	400	411	113	7984	273	8257

Библиографический список

1. *Валиев С.А.* Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов. М.: Машиностроение, 1974. 210 с.

2. *Агеев Н.П.,* Данилин Г.А., Огородников В.П. Технология производства патронов стрелкового оружия. Ч.1. Технологические основы проектирования патронов / БГТУ. СПб., 2005. 352 с.

3. *Агеев Н.П.*, Данилин Г.А., Огородников В.П. Технология производства патронов стрелкового оружия. Ч.2. Процессы штамповки / БГТУ. СПб., 2007. 533 с.

4. *Данилин Г.А.,* Огородников В.П. Теория и расчеты процессов комбинированного пластического формоизменения / БГТУ. СПб., 2004. 304 с.

5. *Данилин Г.А.*, Мишарин И.О. Оценка влияния погрешностей изготовления пуль на кучность боя патронов // Сб. тезисов конф. «Перспективы и научно-технические проблемы создания высокоэффективных боеприпасов наземного РАВ». М.: 3ЦНИИ Минобороны РФ, 2006.

10. ОБЖИМ

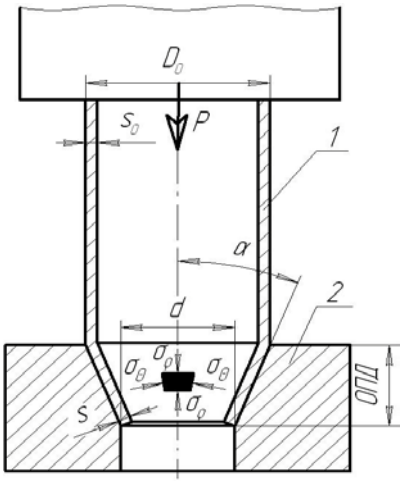


Рис. 10.1. Технологическая схема обжима трубной заготовки (*1*) в конической матрице (*2*)

Одним из прогрессивных процессов листовой формоизменяющей штамповки является обжим, применяемый для формообразования полых деталей из малоотходных трубных и полых заготовок, получаемых с применением других процессов штамповки, например вытяжки, выдавливания. Под обжимом понимают процесс получения полых деталей с различным профилем образующей из полых тонкостенных заготовок путем уменьшения поперечных размеров и утолщения стенок деформируемой части заготовки при воздействии на нее сжимающих сил и напряжений (рис. 10.1).

10.1. Способы обжима

Развитие техники и технологии штамповочного производства на современном этапе привело к созданию разнообразных способов обжима, что требует их классификации, облегчающей рассмотрение известных и прогнозирование новых способов. Классификация построена с учетом принципов, изложенных в разд. 5.

Процессы обжима можно разделить на условно простые и комбинированные. В простых процессах реализуется схема напряженно-деформированного состояния, характерная только для обжима (рис. 10.1). В комбинированных процессах напряженно-деформированное состояние заготовки формируется как результат взаимодействия силовых и деформационных полей разнородных по классификации процессов, например: вытяжка–обжим, обжим–раздача, вытяжка–обжим–раздача, обжим–калибровка. В патронном производстве находит применение последний процесс. Обжим гильз выполняется с обжимным калибрующим, стержнем. При формировании дульца на заключительной стадии процесса кромка дульца заталкивается в зазор между обжимным стержнем и матрицей.

За основные признаки классификации способов обжима приняты:

- вид исходной заготовки;
- схема действия основных и дополнительных сил;

• вид взаимодействия инструмента с заготовкой;
• условия деформации;
• тип применяемого технологического оборудования.

По виду исходной заготовки следует различать обжим полой открытой (трубной) заготовки и полой полузакрытой (с дном). При этом способы обжима краевой части той и другой заготовок аналогичны, но способы обжима закрытой донной части отличаются от них.

По направлению действующих на заготовку основных сил различают продольный, поперечный и комбинированный обжим. При продольном обжиме усилие направлено вдоль оси, при поперечном (радиальном) – перпендикулярно ей, при комбинированном – одновременно вдоль и поперек оси заготовки. Наиболее широко применяется продольный обжим в штампах на прессах и в блоках на АРЛ. В патронном производстве поперечный радиальный обжим применяется при сборке патронов – обжиме дульца гильзы с пулей. Значительно реже применяется поперечный обжим в разъемных матрицах на прессах. Схема поперечного обжима чаще реализуется на радиально-обжимных, ротационно-обжимных, обкатных машинах и станках, на магнитно-импульсных установках. По схеме приложения дополнительных сил следует различать свободный обжим; обжим с подпором заготовки по наружной и (или) внутренней поверхностям, расположенным вне зоны очага пластической деформации; обжим с подпором по внутренней поверхности заготовки в зоне очага пластической деформации; обжим с подпором по всем свободным поверхностям заготовки.

При свободном обжиме с инструментом контактирует по наружной поверхности только деформируемая часть заготовки (см. рис. 10.1).

При обжиме с подпором на отдельных или всех поверхностях, непосредственно не контактирующих с матрицей, действуют дополнительные усилия и напряжения подпора, предотвращающие потерю устойчивости и складкообразование, но не изменяющие существенно механическую схему деформации. Напряжения подпора удовлетворяют условиям: $0 < \sigma_к / \sigma_i < 0{,}1$ – для тонколистовой, $0{,}1 < \sigma_к / \sigma_i < 1{,}0$ – для толстолистовой штамповки.

На рис. 10.2 показаны схемы обжима пульной оболочки открытого типа, с отверстием в вершине, из трубной заготовки в штампе с подпором по наружной и внутренней поверхности.

Известны оригинальные способы продольного обжима с подпором в зоне ОПД и в зоне заготовки, передающей усилие. Давление подпора создается за счет гидростатического давления жидкости, передающегося через эластичный элемент и жесткую разрезную оправку, эквидистантную по конфигурации профилю рабочей части матрицы. Применяют и другие способы обжима в штампах с подпорами [1].

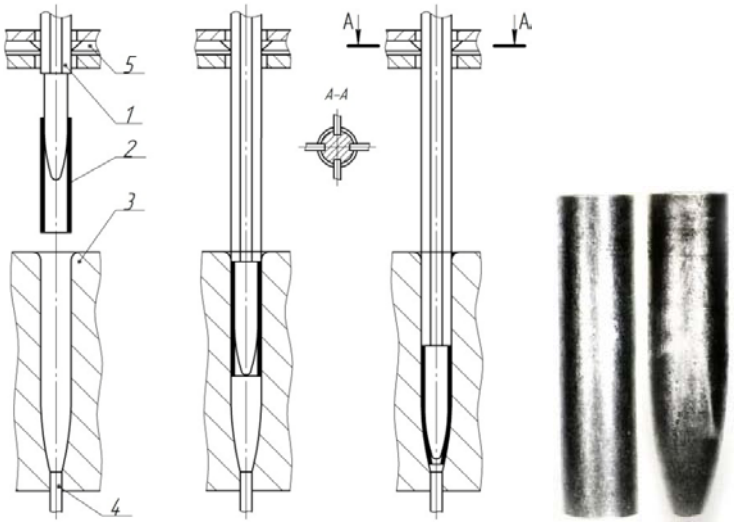


Рис. 10.2. Технологические схемы обжима (*а*, *б*, *в*) с подпором по наружной и внутренней поверхности, заготовка (*г*) и отштампованная деталь (*д*): *1* – пуансон; *2* – заготовка; *3* – матрица; *4* – выталкиватель; *5* – съемник

По виду взаимодействия заготовки и рабочего инструмента выделим способы обжима с реализацией:

- простого поступательного движения и поверхностного контакта (обжим в штампах на прессах и в инструментальных блоках на АРЛ) (рис. 10.3);
- сложного поступательно-качательного движения и линейно-поверхностного контакта (обжим в качающихся матрицах);
- сложного поступательно-вращательного (качательного) движения и точечно-линейного контакта (обжим инструментом трения и роликами);
- сложного и пространственного движения технологической среды (силового поля) и поверхностно-объемного контакта (обжим импульсным электромагнитным полем).

По температурным условиям выделяют обжим без нагрева заготовки, с нагревом вне штампа, с местным нагревом в штампе. По относительной, гомологической температуре процесса следует различать способы с реализацией условий холодной деформации с полным и неполным деформационным упрочнением, полугорячей и горячей деформации.

В соответствии с классификацией по скоростным условиям деформации выделяют способы статические, скоростные, высокоскоростные и импульсные. К статическим относятся способы обжима в штампах на механических и гидравлических прессах, к скоростным – на ротационно-обжимных машинах, к высокоскоростным – на пневмомеханических машинах, к импульсным – на установках для электромагнитной и электрогидравлической штамповки.

В патронном производстве преимущественно применяют способы продольного обжима с калибровкой на АРЛ.

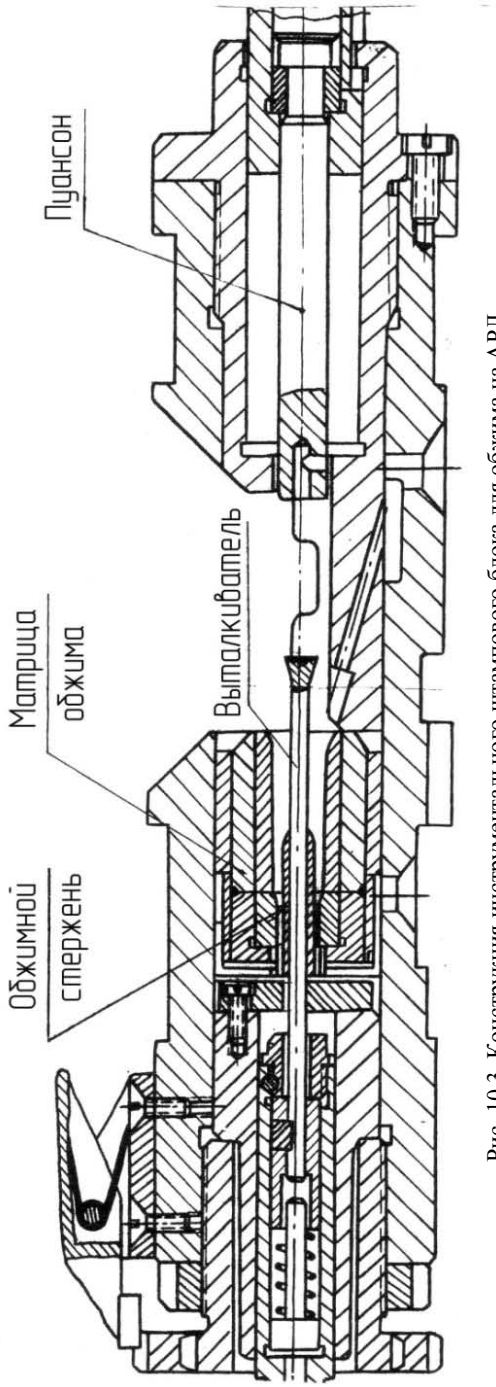


Рис. 10.3. Конструкция инструментального штампового блока для обжима на АРЛ

10.2. Технологические особенности процесса продольного обжима гильз

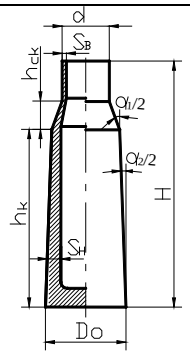
В соответствии с классификацией способов обжима, представленной в подразд. 10.1, применяемые при изготовлении гильз способы обжима характеризуются следующими признаками:

1) по виду исходной заготовки – полая тонкостенная, с толстым дном и переменными по высоте толщиной стенки и механическими свойствами заготовка (обжимаемая часть заготовки отожжена, остальная часть наклепана на предшествующих вытяжных операциях);

2) по виду штампуемой детали – полая, ступенчатой конической формы деталь с заданными, различными по высоте, механическими свойствами (табл. 10.1);

Таблица 10.1

Размерные характеристики деталей, получаемых обжимом в ступенчатых конических матрицах



Абсолютные размеры, мм							Углы		Относительные размеры		
H	D_0	d	$S^в$	$S^н$	$h_к$	$h_{ск}$	$2\alpha_1$	$2\alpha_2$	$\frac{S^в}{D_0}$	m_Σ	$\frac{н}{D_0}$
40,0 … 1000	9,78 … 215,0	6,16 … 201,3	0,24 … 2,0	0,59 … 6,3	25,6 … 817,5	4,0 … 289,0	1,26º … 45º	0,24º … 2,42º	0,006 … 0,032	0,630 … 0,974	2,180 … 6,990

3) по схеме действия основных сил – продольный обжим (сила направлена вдоль оси заготовки);

4) по схеме действия дополнительных сил – свободный обжим либо без дополнительных сил, либо с противодавлением при одновременной с обжимом калибровке внутреннего диаметра обжатого дульца;

5) по виду движения заготовки и рабочего инструмента – с простым поступательным движением;

6) по условиям деформации – без нагрева заготовки, при «статических» и (или) скоростных условиях деформации (при реализации условий граничного трения);

7) по типу применяемой технологической оснастки и оборудования – преимущественно в инструментальных блоках на АРЛ и РКЛ;

8) по форме рабочего инструмента – в ступенчатых конических матрицах.

Соответственно к технологическим особенностям процесса обжима гильз относятся:

- нестационарность;

• формирование двух основных очагов интенсивной пластической деформации (ОПД) на участках ступеней матрицы с большим (зона ската) и малым (зона корпуса) углами конусности матрицы соответственно;

• плоская схема напряженного состояния заготовки в ОПД при действии только сжимающих напряжений;

• возможность потери устойчивости заготовки с образованием поперечных и (или) продольных складок;

• утолщение стенок в зонах ОПД;

• неполное соответствие отштампованной гильзы в зоне дульца по форме и размерам рабочему инструменту.

• возможность окончательного формообразования детали за одну или несколько последовательно выполняемых операций.

Нестационарность процесса иллюстрируется видом типовой диаграммы «усилие–путь инструмента» («*P*-*h*», рис. 10.4,*а*,*б*).

На основе анализа машинной диаграммы (рис. 10.4,а,*б*) выделены семь характерных стадий процесса первого обжима. Первая стадия соответствует обжиму краевой части заготовки в первой ступени матрицы с углом конусности α_1 (*OA*). На второй стадии кромка заготовки переходит на вторую коническую ступень матрицы с углом конусности α_2, искривляется и образует участок сопряжения двух ступеней матрицы, что сопровождается ростом усилия из-за действия изгибающего момента (*AB*). На третьей стадии (*BC*) образуется свободный участок неприлегания заготовки (кромка заготовки отходит от поверхности матрицы), что уменьшает рост усилия обжима. После достижения криволинейным участком неприлегания критической длины происходит его спрямление до полного контакта с поверхностью второй ступени матрицы. Затем начинается четвертая стадия, характеризующая обжим во второй конической ступени (*CD*).

На четвертой стадии, из-за дальнейшего уменьшения диаметра краевой части заготовки и увеличения размеров очага деформации, увеличивается усилие обжима. На пятой (*DE*), шестой (*EF*) и седьмой (*FG*) стадиях процесса происходит сход краевой части заготовки с конической ступени матрицы с образованием участка неприлегания, его искривление и формирование цилиндрической ступени (дульца) штампуемой детали. Увеличение числа ступеней матрицы соответственно отразится на виде машинной диаграммы «*P*–*h*» и количестве стадий процесса.

Отличительные особенности процесса последующего обжима гильз по сравнению с первым обжимом:

• меньшая величина рабочего хода и большая интенсивность роста усилия dP/dh ввиду положительной разности углов конусности матриц на последующих (*i*-й) и предыдущей (*i*–1-й), в том числе первой, операции, т.е.

$$\alpha_{1i} - \alpha_{1i-1} > 0; \quad \alpha_{1i} - \alpha_{11} > 0;$$

$$\alpha_{2i} - \alpha_{2i-1} > 0; \quad \alpha_{2i} - \alpha_{22} > 0;$$

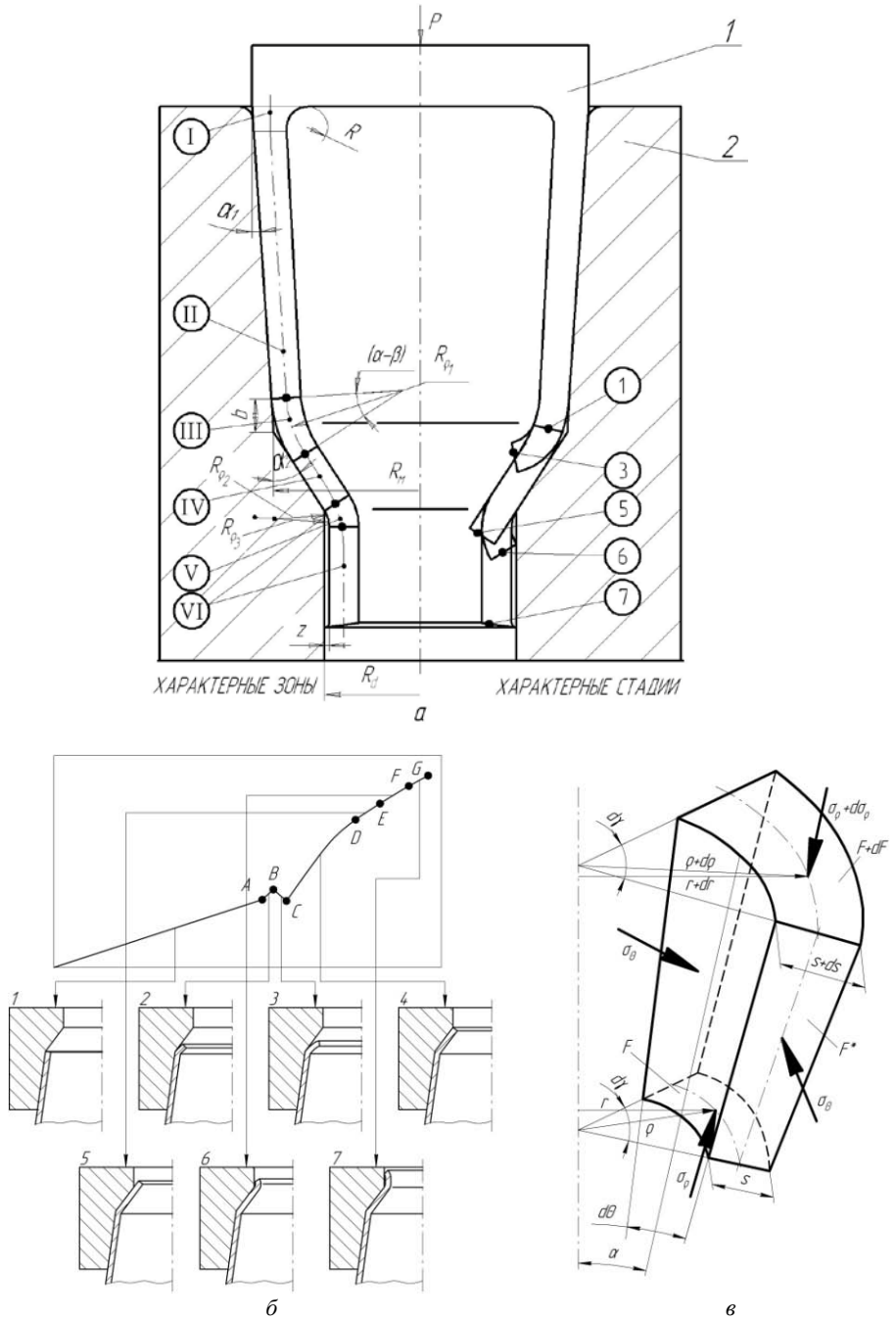


Рис. 10.4. Технологическая схема обжима заготовки гильзы (*а*), машинная диаграмма «усилие–путь инструмента» *P*–*h* (*б*) и схема напряженного состояния в зоне ОПД (*в*)

• формирование между участками ОПД-1 (в верхней матрице) и ОПД-2 (в нижней матрице) промежуточной зоны *A* заготовки, не подвергаемой пластической деформации и «работающей» в области упругих деформаций (рис. 10.5). Наружная поверхность на высоте $h_{i\text{СВ}}$ – свободная, так как не контактирует с матрицей. После выхода края заготовки из верхней матрицы и до момента его входа в нижнюю при малых углах конусности верхней матрицы d_{1i} процесс будет близок к квазистационарному, что характеризуется малым изменением усилия деформирования.

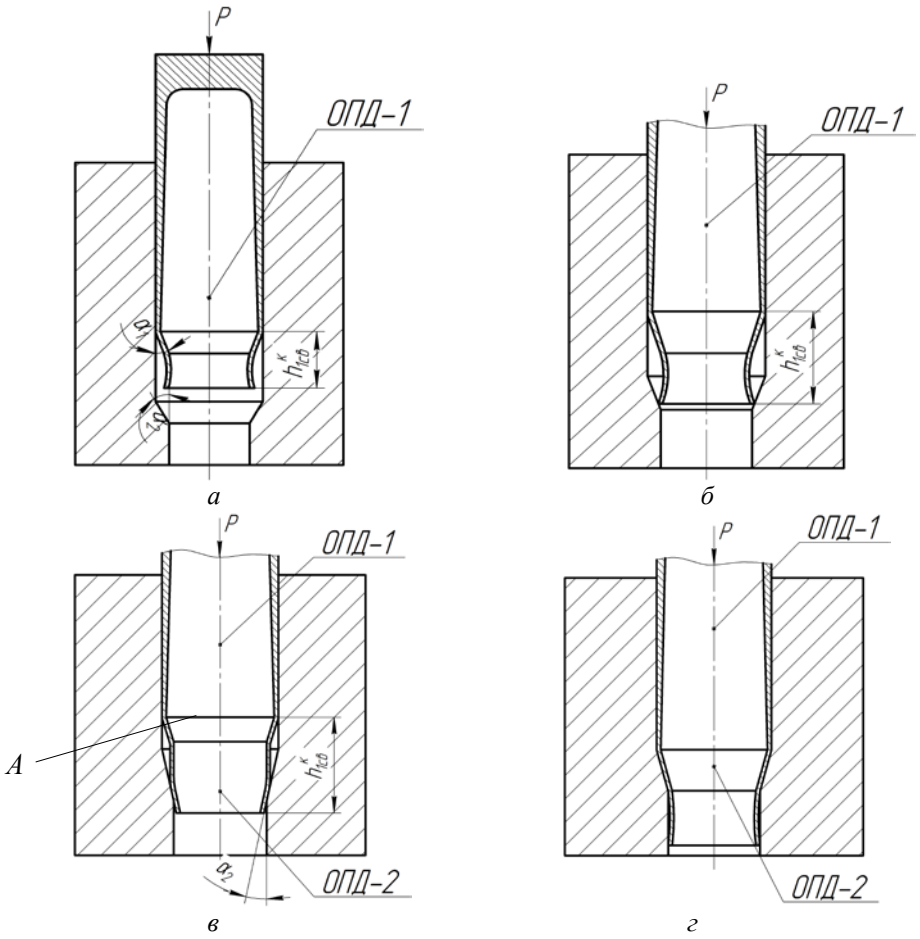


Рис. 10.5. Формообразование заготовки на стадиях второго (последующего) обжима: *а, б* – начало и конец первой стадии процесса; *в* – вторая и третья стадии процесса; *г* – заключительная стадия процесса

Напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе продольного обжима в конической ступенчатой матрице исследовалось экспериментально с применением метода делительной сетки. Исследование проведено с использованием полых тонкостенных заготовок с дном с относительной толщиной кромки $S_0^{\text{к}}/D_0$ = 0,028…0,030 ($S_0^{\text{в}}$ – толщина стенки у верхнего сечения), из низкоуглеродистых сталей 11ЮА и 18ЮА.

Напряженно-деформированное состояние исследовалось на первом и последующем (втором) обжимах в двухступенчатых матрицах (α_{11} = α_{21} = = 0,5°…1°; $\alpha_{12} = \alpha_{22}$ = 20°…45°, где α_{11}, α_{12}, α_{21}, α_{22} – углы конусности первой и второй ступени на первой и второй операциях соответственно). Перед первым обжимом краевая часть заготовки отжигалась.

Делительная сетка в виде кольцевых и продольных рисок наносилась специальной иглой на токарном станке. В каждом фиксированном сечении измеряли диаметр и толщину стенки заготовки и расстояния между кольцевыми рисками до и после деформации на инструментальном микроскопе с погрешностью измерения 0,001 мм. Толщина стенки заготовки измерялась индикатором часового типа с погрешностью 0,01 мм.

При обработке результатов измерений и расчете параметров НДС приняты следующие допущения:

1. Материал заготовки изотропный, а деформация в пределах ячейки, образованной продольной и кольцевой рисками, однородна.
2. Формоизменение заготовки в очаге деформации протекает приближенно монотонно.
3. Главные оси напряжений и деформаций совпадают с направлением нормали и касательной к срединной поверхности заготовки.
4. Деформации и напряжения распределены равномерно по толщине заготовки.

Главные компоненты деформации рассчитывали по формулам

$$\varepsilon_\theta = \ln\frac{D_{i,j+1}}{D_{ij}},\ \varepsilon_\rho = \ln\frac{L_{i,j+1}}{L_{ij}},\ \varepsilon_{\text{n}} = -(\varepsilon_\theta + \varepsilon_\rho),$$

где D_{ij}, $D_{i,j+1}$ – диаметры заготовок в i-м сечении; L_{ij}, $L_{i,j+1}$ – расстояния между соседними кольцевыми рисками до и после деформации соответственно.

Остальные параметры деформированного состояния рассчитывали по известным в теории пластичности соотношениям. Для проверки достоверности принятого допущения о приближенно-монотонной деформации заготовки в ОПД проводили постадийное деформирование и расчет деформаций. Главные напряжения определяли по формулам

$$\sigma_\rho = \frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}(\varepsilon_\rho - \varepsilon_{\text{n}}),\ \sigma_\theta = \frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}(\varepsilon_\theta - \varepsilon_{\text{n}}),\ \sigma_{\text{n}} = -1{,}1\sigma_i\frac{S}{r}\cos\alpha,$$

где S, r – толщина стенки и радиус наружной поверхности в расчетном сечении.

Для построения диаграммы «$\sigma_i - \varepsilon_i$» и определения основных характеристик механических свойств материала заготовок использован метод испытания кольцевых образцов на растяжение. Диаграмма «$\sigma_i - \varepsilon_i$» аппроксимирована многочленом. Выполненная оценка погрешности расчетов параметров деформированного состояния свидетельствует о невысокой погрешности (0,4…2,3%) для зон интенсивной деформации и большей погрешности (3…10%) для зон с малой деформацией ($\varepsilon_i < 0{,}05$).

На основании анализа результатов экспериментального исследования (рис. 10.6, 10.7) установлено следующее. При всех условиях деформирования (первый и второй обжимы, $m_1 = 0{,}82…0{,}84$, $m_2 = 0{,}74…0{,}97$, $m_{2\Sigma} = 0{,}622…0{,}795$, где $m_{2\Sigma} = m_1\, m_2$; $m_1 = d_1 / D_0$, $m_2 = d_2 / d_1$ – коэффициенты обжима на первом и последующих обжимах; d_1, d_2 – наружные диаметры обжатой цилиндрической части заготовок после первого и второго обжимов) качественный характер изменения параметров деформированного состояния вдоль образующей примерно одинаков. Наибольшая деформация (по величине интенсивности ε_i и главных компонентов $\varepsilon_\rho, \varepsilon_\theta, \varepsilon_n$ деформации) отвечает обжатой в двух ступенях матрицы цилиндрической части заготовки (дульцу), наименьшая – нижней части обжимаемого корпуса заготовки и средняя – средней части (скату) деформируемой заготовки.

При этом в зоне кромки главные компоненты ε_ρ и ε_θ наибольшие по величине, а максимум ε_n и, соответственно, ε_i смещены относительно кромки, что объясняется влиянием отношений главных напряжений $\sigma_\rho / \sigma_\theta$, которое возрастает по мере удаления от края в связи с увеличением σ_ρ, играющих роль напряжений подпора, и согласуется с известными представлениями. В соответствии с этим изменяется и вид деформированного состояния от сжатия ($\nu_\varepsilon = 0{,}8…0{,}9$) на кромке до сдвига ($\nu_\varepsilon = 0{,}10…0{,}30$) в нижней части корпуса.

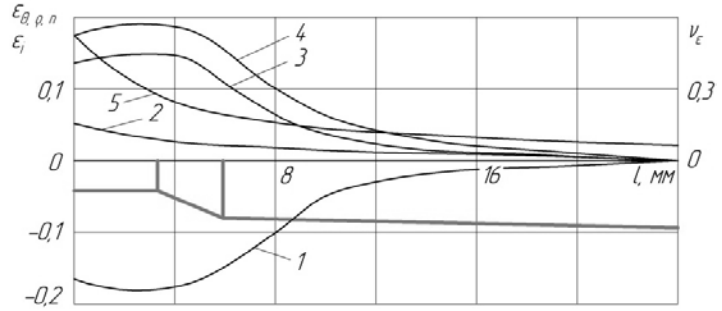


Рис. 10.6. Распределение компонентов $\varepsilon_\theta, \varepsilon_\rho, \varepsilon_\text{п}$ (*1–3*), интенсивности ε_i (*4*) и характеристики вида (*5*) деформации в продольном сечении заготовки при первом обжиме (материал – сталь 18ЮА)

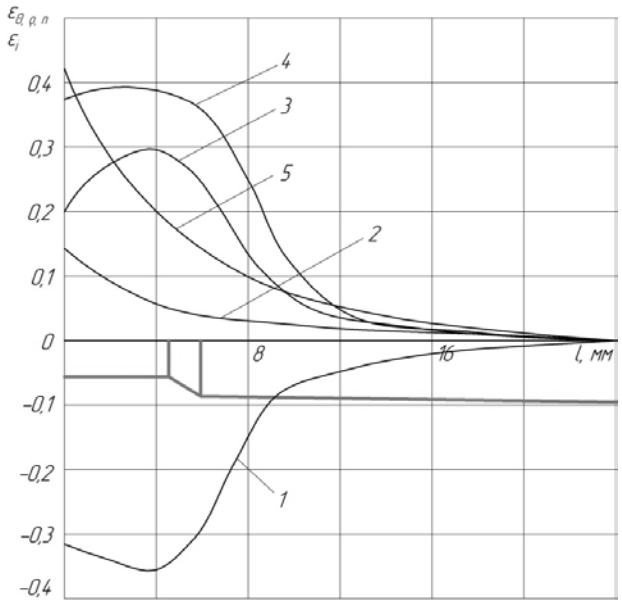


Рис. 10.7. Распределение компонентов деформации $\varepsilon_\theta, \varepsilon_\rho, \varepsilon_\text{п}$ (*1–3*), суммарной степени деформации $e_{i\Sigma}$ (*4*) и характеристики вида деформации ν_ε (*5*) в продольном сечении заготовки гильзы при втором обжиме (материал – сталь 18ЮА)

Проверка допущения о монотонности процессе деформации проводилась путем сопоставления значений ε_i, рассчитанных по соотношению размеров исходной и конечной заготовки, со значениями $\varepsilon_{i\Sigma} = \sum_{i=1}^{N} \varepsilon_{ii}$ ($\varepsilon_{i\Sigma}, \varepsilon_{ii}$ – суммарная и постадийная интенсивности деформации, N – количество стадий), определяемыми расчетом по размерам, изменяющимся по стадиям. Так, например, в наиболее деформированной части заготовки, зоне кромки, значение ε_i на первом обжиме в двух расчетных сечениях составило 0,213 и 0,154, на втором обжиме – 0,017 и 0,046, $\varepsilon_{i\Sigma} = 0{,}230$ и 0,200 соответственно. При расчете по соотношению размеров заготовки в исходном состоянии и после второго обжима получили 0,236 и 0,204. Изменение вида штампуемого материала (замена стали 11ЮА на сталь 18ЮА) не внесло изменений в деформированное состояние. Изменение напряженного состояния заготовки вдоль ее образующей после первого и второго обжимов показано на рис. 10.8, 10.9.

Во всех случаях отмечается увеличение по модулю всех главных компонентов $\sigma_\rho, \sigma_\theta, \sigma_\text{п}$ и интенсивности σ_i напряженного состояния при переме-

щении от кромки к дну заготовки. Некоторое уменьшение σ_ρ и σ_i у придонного участка связано с весьма малым обжатием заготовки, близким к нулевой деформации, по сравнению с вышележащими сечениями. Такое изменение вызвано характером распределения механических свойств исходной заготовки, полученной способом вытяжки с утонением и значительно упрочненной с местным отжигом краевой части заготовки перед обжимом.

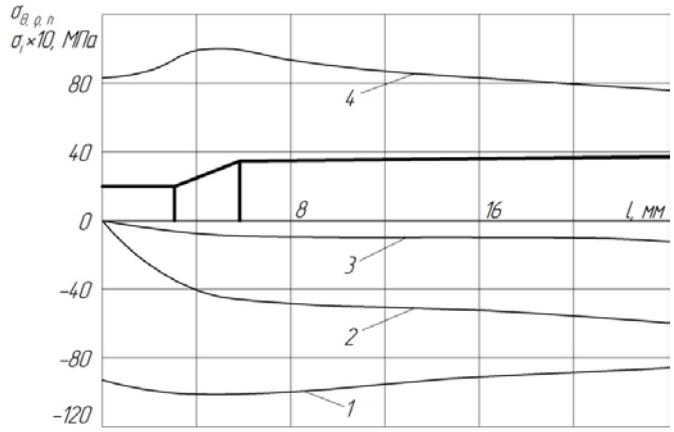


Рис. 10.8. Распределение компонентов $\sigma_\theta, \sigma_\rho, \sigma_\text{п}$ (*1–3*) и интенсивности σ_i (*4*) напряженного состояния в продольном сечении заготовки гильзы при первом обжиме (материал – сталь 18ЮА)

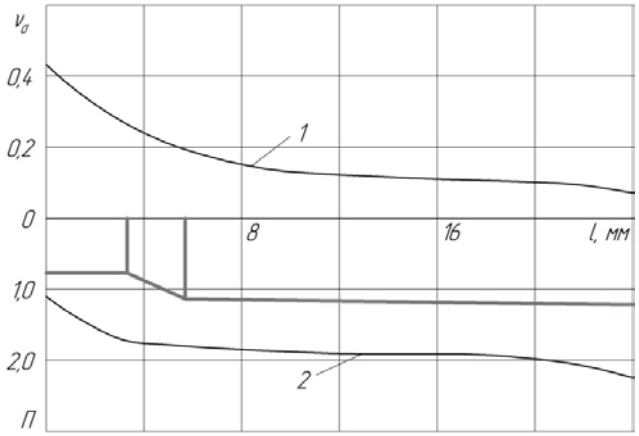


Рис. 10.9. Распределение характеристики вида ν_σ (1) и показателя K (2) в продольном сечении заготовки на первом обжиме (материал – сталь 18ЮА)

Так, исходная заготовка из стали 11ЮА имела следующее распределение характеристик прочности по длине: у среза $\sigma_{0,2}$ = 300…540 МПа, $\sigma_в$ = 510…660 МПа; в средней части $\sigma_{0,2}$ = 540…560 МПа, $\sigma_в$ = 730 МПа; в нижней части (у дна) $\sigma_{0,2}$ до 660 МПа, $\sigma_в$ до 800 МПа. Такой характер распределения механических свойств повышает несущую способность корпуса заготовки и тем самым предотвращает потерю продольной устойчивости. Из приведенных графических зависимостей следует, что схема напряженного состояния в целом близка к плоской одноименной, так как одно из главных напряжений σ_n мало по сравнению с двумя другими: σ_ρ и σ_θ. При этом показатель жесткости схемы напряженного состояния $K = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/\sigma_i$ изменяется от –1,1…–1,3 у кромки дульца до –1,3…–1,4 в средней части и до –1,85 в нижней части деформированной заготовки. Изменение вида исследуемого материала (переход к стали 18ЮА) и коэффициента обжима (его уменьшение) не изменяет отмеченной закономерности распределения параметров напряженного состояния, но повышает уровень напряжений ($\sigma_\rho, \sigma_\theta, \sigma_n$ и σ_i). Распределение параметров НДС свидетельствует о формировании при обжиме в ступенчатой матрице нескольких (по числу ступеней матрицы) ОПД, существенно различающихся по схеме напряженно-деформированного состояния.

Приближенное решение задачи по определению напряжений и усилий в граничных условиях для случая нестационарного процесса обжима в ступенчатых конических матрицах с применением безмоментной теории оболочек дано автором и А.В. Дриго [1,2]. На основе изложенных выше результатов экспериментального исследования определены семь характерных стадий. При анализе каждой из них рассматривается равновесие бесконечно малого элемента, который выделен в заготовке поверхностями, эквидистантными срединной поверхности и отстоящими на расстояние *dz* друг от друга, а также двумя плоскостями, проходящими через ось симметрии и составляющими между собой угол $d\gamma$ (см. рис. 10.4,*в*). Местоположение этого элемента в очаге деформации координируется радиусом ρ от оси симметрии и углом α между касательной к поверхности в меридиональном сечении и осью симметрии. Расстояние ρ и величина угла α связаны между собой функционально.

С учетом результатов экспериментального исследования приняты следующие допущения:

- процесс деформации в пределах каждой из выделяемых стадий протекает приближенно-монотонно;
- материал заготовки изотропный;
- главные оси напряжений и деформаций совпадают с направлениями нормали и касательной к срединной поверхности;
- деформации и напряжения по толщине заготовки не изменяются;

- нормальные к срединной поверхности напряжения на всех стадиях процесса малы по сравнению с меридиональными и тангенциальными (окружными) напряжениями, и схема напряженного состояния принимается плоской;
- силы трения, действующие на контактной поверхности заготовки, подчиняются закону Кулона;
- заготовка считается тонкостенной ($S/d \le 0{,}01$);
- принимается гипотеза идеальной пластичности.

Анализ выполняется от первой к завершающей, седьмой, стадии. Исходными уравнениями являются уравнение равновесия сил, спроецированных на направление касательной к срединной поверхности заготовки, и приближенное уравнение пластичности:

$$d\sigma_\rho + \sigma_\rho\left(\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dS}{S}\right) - \sigma_\theta \frac{d\rho}{\rho}(1 + f\ \mathrm{ctg}\,\alpha_1) = 0; \qquad (10.1)$$
$$\sigma_\theta = -b\sigma_i.$$

Приняв закон изменения толщины стенки в процессе обжима на первой стадии: $S = S_0 \dfrac{R_0 + \rho_1}{\rho + \rho_1}$, после несложных преобразований получим

$$\sigma_{\rho i} = -2\psi\left(1 - \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho}}\right) + \sum_{i=2}^{N} \Delta\sigma_{\rho i}\sqrt{\frac{\rho_1}{\rho}}, \qquad (10.2а)$$

где $\psi = b\sigma_i(1 + f\mathrm{ctg}\alpha_1)$; N – число стадий процесса; ρ_1 – радиус кромки (рис. 10.10,*а*); $\Delta\sigma_{\rho i}$ – приращение напряжения на каждой последующей стадии.

В частности, для первой стадии ($i = 1$) с учетом граничных условий (рис. 10.10,*а*) и допущения о том, что угол между образующей рабочей поверхности матрицы и продольной осью равен углу между образующей срединной поверхности заготовки и той же осью, выражение для определения меридионального напряжения в первом ОПД будет иметь вид

$$\sigma_{\rho 1} = -2b\sigma_{i1}(1 + f\mathrm{ctg}\alpha_1)\left(1 - \sqrt{\frac{R_0 - h_1\mathrm{tg}\alpha_1}{R_0}}\right), \qquad (10.2б)$$

где h_1, α_1 – высота и угол конусности первой ступени матрицы.

Вторая стадия процесса характеризуется образованием сопрягающей поверхности заготовки с радиусом $R_{\rho 1}$ между двумя коническими ступенями с углами α_1 и α_2 матрицы обжима (рис. 10.10,*б*) и формированием нового ОПД.

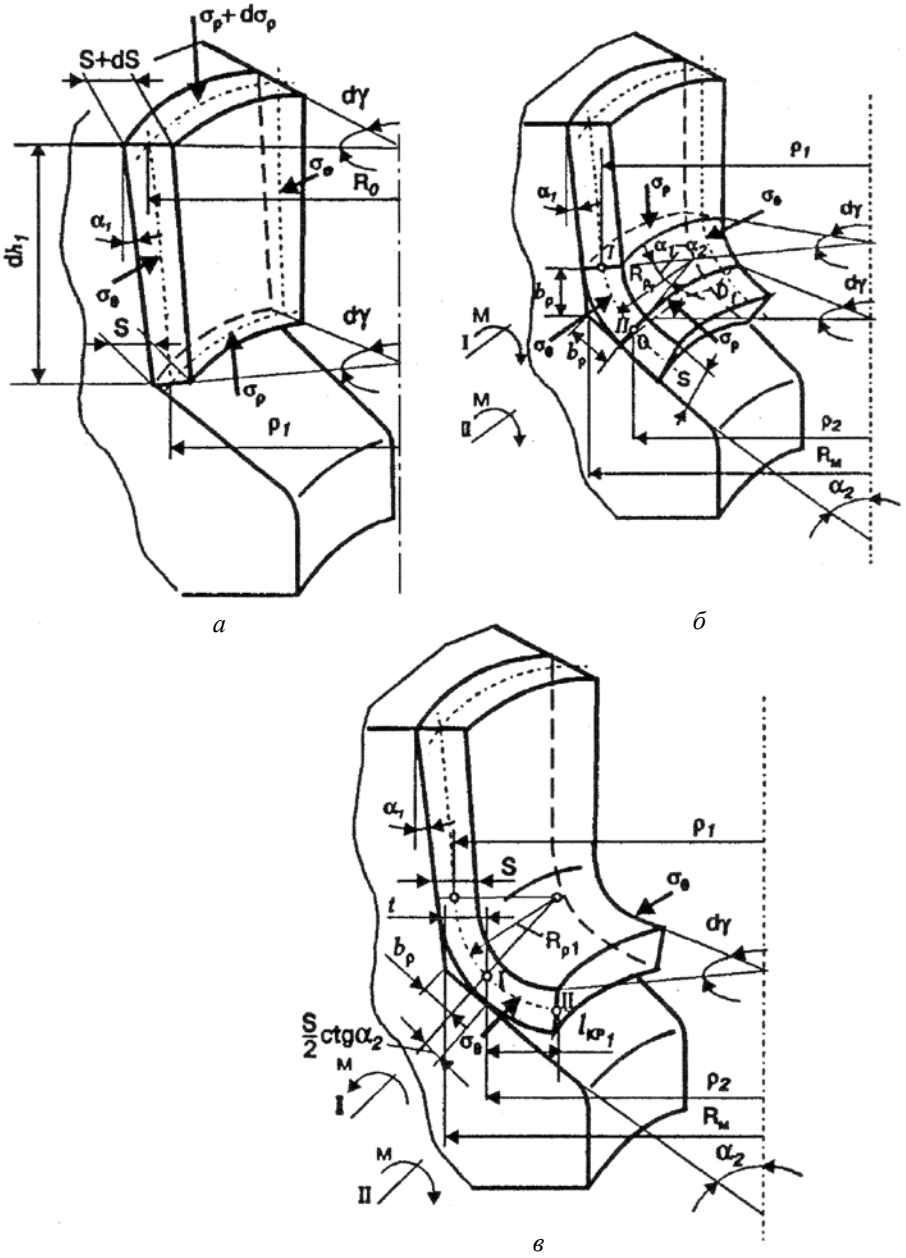


Рис. 10.10. Схемы формоизменения и нагружения краевой части заготовки на первой (*а*), второй (*б*) и третьей (*в*) стадиях процесса обжима

Принято, что кривизна срединной поверхности заготовки в меридиональном сечении участка изгиба определяется действием моментов и сил, создаваемых напряжением σ_ρ и σ_θ, и величина этой кривизны определяется условием равенства моментов, действующих по границам участка изгиба, и моментов от действия элементарных сил, образованных напряжениями σ_ρ и σ_θ. Принято также, что длина участка изгиба в меридиональном сечении равна: $l = R_{\rho 1}\sin(\alpha_1 - \alpha_2) \approx R_{\rho 1}(\alpha_1 - \alpha_2)$ и на этом участке формируется свободная поверхность, определяемая размером b_ρ. При принятых допущениях уравнение равновесия, выраженное через моменты относительно сечения O-O_1, записывается в следующем виде:

$$2M - M_{\sigma_\rho} - 2M_{\sigma_\theta} = 0, \tag{10.3}$$

где $M_{\sigma_\rho} = \sigma_\rho S\rho_1 d\gamma[1 - \cos(\alpha_2 - \alpha_1)]R_{\rho 1}$; $M_{\sigma_\theta} = \frac{1}{4}\sigma_\theta S R_{\rho 1}^2 \sin^2(\alpha_2 - \alpha_1)d\gamma$ – моменты от действия напряжений σ_ρ и σ_θ.

Координату начальной точки искривления ρ_1 находят из геометрических соотношений (рис. 10.10,*б*):

$$\rho_1 = R_м - \frac{S}{2}\cos\alpha_1 + b_\rho \sin\alpha_1, \tag{10.4}$$

где $b_\rho = (R_{\rho 1} + S/2)\operatorname{tg}\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}$. Принимаем

$$M \approx \frac{1}{4} b\sigma_i S^2 \rho_1 d\gamma. \tag{10.5}$$

В результате совместного решения уравнений (10.3)–(10.5) при принятии допущения $\sigma_\rho = 0$ на кромке определим радиус кривизны на участке изгиба:

$$R_{\rho 1} = \frac{S\sqrt{\frac{1}{2}\left(2\frac{R_м}{S} - \cos\alpha_1 + \sin\alpha_1 \operatorname{tg}\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right)}}{\sin(\alpha_2 - \alpha_1)}. \tag{10.6}$$

Как известно из работ Е.А. Попова, изменение кривизны срединной поверхности заготовки в меридиональном сечении приводит к увеличению σ_ρ на $\Delta\sigma_\rho$:

$$\Delta\sigma_\rho = \frac{b\sigma_i S}{4R_i}. \tag{10.7 а}$$

Подставив значение $R_i = R_{\rho 1}$ и учитывая двойное изменение кривизны в конце второй стадии, получим

$$\Delta\sigma_{\rho 2} = -\frac{2b\sigma_i \sin(\alpha_2 - \alpha_1)}{\sqrt{8\left(2\frac{R_м}{S} - \cos\alpha_1 + \sin\alpha_1 \mathrm{tg}\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right)}}. \qquad (10.7б)$$

При подстановке значения $\Delta\sigma_{\rho_2}$ по (10.7б) в (10.2а) при $N = 2$ можно определить максимальное напряжение в конце второй стадии процесса.

На третьей стадии формируется участок свободного изгиба (рис. 10.10,*в*). При достижении этим участком критического размера $l_{\text{êð}1}$ начинается его спрямление под действием изгибающего момента M от сжимающих напряжений σ_θ (по краю заготовки $\sigma_\rho \approx 0$): $M = \frac{1}{4} b\sigma_i S^2 \rho_2 d\gamma$.

Если принять, что радиус кривизны постоянен на участке длиной $l_{\text{кр}1}$, то условие равенства моментов запишется в виде

$$2\sigma_\theta S l_{\text{кр}1} \frac{d\varphi}{2} \frac{l_{\text{кр}1}}{2} = \frac{1}{4} b\sigma_i S^2 \rho_2 d\gamma,$$

где $d\varphi = \cos\alpha_2 d\gamma$; $\sigma_\theta = -b\sigma_i$; $\rho_2 = R_м - t$;

$$t = \left(b_\rho + \frac{S}{2}\mathrm{ctg}\alpha_2\right)\sin\alpha_2 = b_\rho \sin\alpha_2 + \frac{S}{2}\cos\alpha_2.$$

Из этого равенства определим

$$l_{\text{кр}_1} = \sqrt{\frac{S\left[R_м - \sin\alpha_2\left(R_{\rho 1} + \frac{S}{2}\mathrm{tg}\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) - \frac{S}{2}\cos\alpha_2\right]}{2\cos\alpha_2}}.$$

Четвертая стадия процесса начинается с момента начала скольжения заготовки по второй ступени конической матрицы с угломα_2, когда формируется новый ОПД (рис. 10.10,*а*). Как показал анализ, характер протекания четвертой стадии подобен первой, поэтому по аналогии с (10.2б)

$$\sigma_{\rho 4} = -2b\sigma_{i4}\left(1 + f\mathrm{ctg}\alpha_2\right)\left(1 - \sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_2}}\right),$$

где $\rho_3 = \rho_2 - h_2 \mathrm{tg}\alpha_{.2}$.

С учетом приведенных выше геометрических соотношений получим

$$\sigma_{\rho 4} = -2b\sigma_{i4}\left(1 + f\mathrm{ctg}\alpha_2\right) \times$$

$$\times\left[1 - \sqrt{\frac{R_м - \sin\alpha_2\left(R_{\rho 1} + \frac{S}{2}\mathrm{tg}\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) - \frac{S}{2}\cos\alpha_2 - h_2\mathrm{tg}\alpha_2}{R_м - \sin\alpha_2\left(R_{\rho 1} + \frac{S}{2}\mathrm{tg}\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) - \frac{S}{2}\cos\alpha_2}}\right]. \qquad (10.8)$$

При переходе от конического участка очага деформации к образующейся цилиндрической части детали должен появиться участок с новым ОПД, в котором деформация происходит при активном воздействии изгибающих моментов. Если радиус скругления кромки на переходе от конической части матрицы к цилиндрической мал, то элементы краевой части заготовки сходят с конической поверхности матрицы и теряют с ней контакт (рис. 10.11,*а*). В этом случае, как было показано ранее, изгибающий момент может быть образован лишь действием тангенциальных напряжений. Если тангенциальные напряжения равны напряжению текучести, то для создания момента, необходимого для пластического изгиба, нужно, чтобы длина участка в меридиональном направлении достигла значения $l_{кр2}$:

$$l_{кр_2} = \sqrt{\frac{S(\rho_2 - h_2 \operatorname{tg}\alpha_2)}{2\cos\alpha_2}}. \qquad (10.9)$$

После этого напряжение σ_θ создает момент, достаточный для изгиба, и радиус кривизны срединной поверхности элементов, сходящих с конической поверхности матрицы, начинает изменяться в меридиональном сечении от бесконечности до радиуса свободного изгиба $R_{\rho 2}$, что означает начало шестой стадии процесса (рис. 10.11,*б*). При этом меридиональные напряжения увеличиваются. Влияние изгиба может быть приближенно оценено, если принять, как это сделано выше, что действие изгибающего момента увеличивает меридиональное напряжение на величину $\Delta\sigma_\rho$, рассчитываемую по соотношению (10.7а). Для определения $R_{\rho 2}$ необходимо определить момент, возникающий от действия окружных напряжений σ_θ, который и вызывает этот изгиб. Расчетная схема показана на рис. 10.11,*б* и *в*. Из геометрических отношений следует:

$$b_1 = a_1 \sin(\delta - \alpha_2); b_2 = a_2 \sin(\delta - \alpha_2);$$

$$m + (a_1 + a_2)\sin(\delta - \alpha_2) = R_{\rho_2} \sin\alpha_2;$$

$$m = R_{\rho 2}\left[\sin\alpha_2 - \sin(\delta - \alpha_2)\right];$$

$$\frac{b_1}{a_1} = \frac{b_2}{a_2}; a_1 + a_2 = R_{\rho_2}; m + b_1 + b_2 = R_{\rho_2}\sin\alpha_2; \frac{b_2}{a_2} = \sin(\delta - \alpha_2);$$

$$h = 2R_{\rho 2}\sin\alpha_2 - m;$$

$$h = 2R_{\rho 2}\sin\alpha_2 - R_{\rho 2}\left[\sin\alpha_2 - \sin(\delta - \alpha_2)\right]$$

или

$$h = 2R_{\rho 2}\left[\sin\alpha_2 + \sin(\delta - \alpha_2)\right]. \qquad (10.10)$$

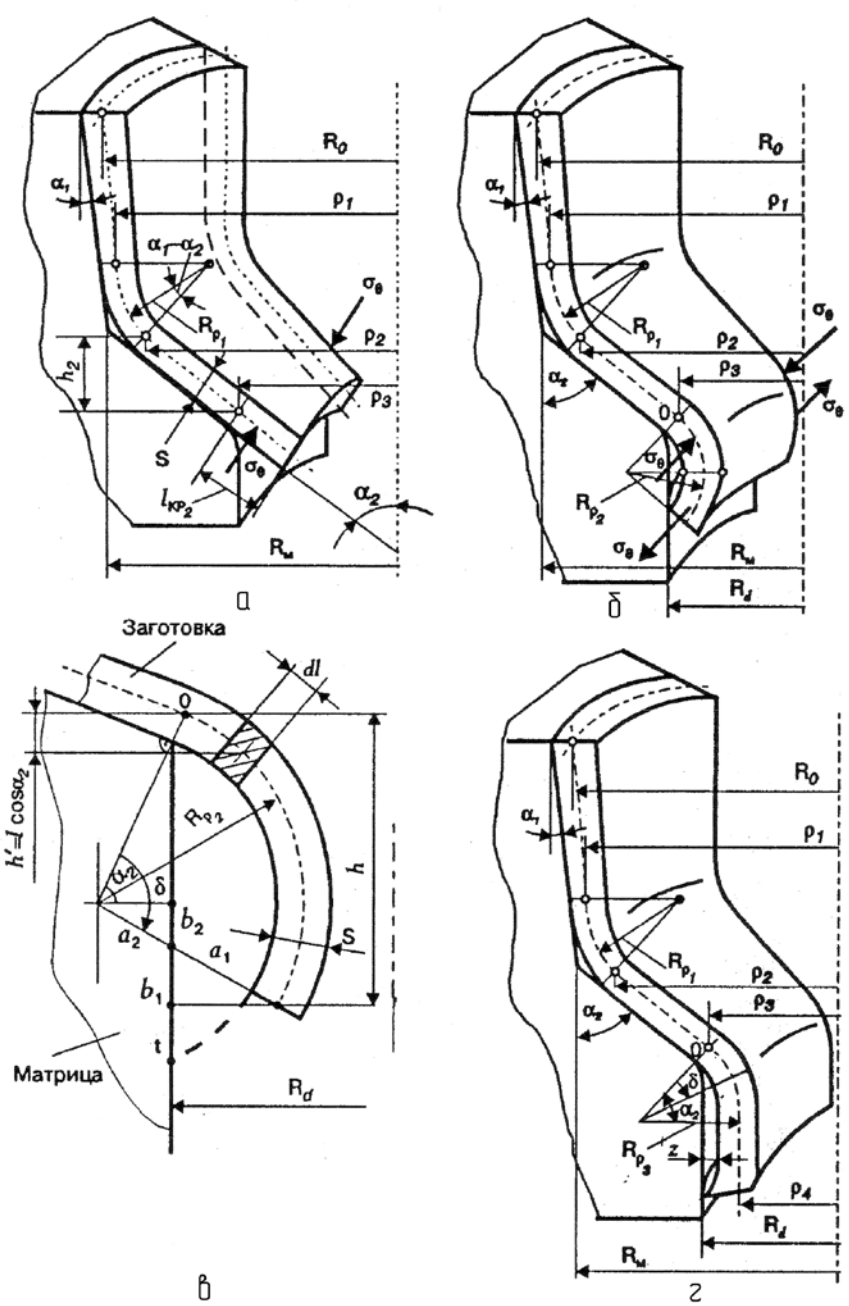


Рис. 10.11. Схемы формоизменения и нагружения краевой части заготовки на четвертой и пятой (*а*), шестой (*б*, *в*) и седьмой (*г*) стадиях процесса обжима

Если $\delta = 2\alpha_2$, то $h = 2R_2 \sin\alpha_2$; если $\delta = 0$, то $h = 0$, т.е. $\delta \in [0, 2\alpha_2]$.

Сила dT, вызывающая момент на плече h относительно оси O, определится как

$$dT = 2\sigma_\theta S \sin\frac{d\gamma}{2} R_{\rho 2} d\delta.$$

Тогда момент силы T на участке, изменяющемся от нуля до $2\alpha_2$, будет равен:

$$M_{\sigma\theta} = \int_0^{2\alpha_2} 2R_{\rho 2}[\sin\alpha_2 + \sin(\delta - \alpha_2)]\sigma_\theta \sin\frac{d\gamma}{2} S R_{\rho 2} d\delta. \qquad (10.11)$$

Интегрируя (10.11) и подставляя полученное выражение в (10.5), с учетом условия пластичности (10.1) после несложных преобразований получим расчетную формулу для определения радиуса свободного изгиба на этом участке заготовки:

$$R_{\rho 2} = \sqrt{\frac{\rho_2 S}{8\alpha_2 \sin\alpha_2}}. \qquad (10.12)$$

Это дает возможность определить приращение меридионального напряжения за счет искривления кромки заготовки по формуле (10.7а), т.е.

$$\Delta\sigma_{\rho 6} = -\frac{b\sigma_i S}{4R_{\rho 2}}. \qquad (10.13)$$

Завершающая, седьмая, стадия процесса характеризуется увеличением длины обжатой цилиндрической части заготовки и увеличением радиуса изгиба кромки заготовки $R_{\rho 2}$ до окончательного радиуса $R_{\rho 3}$ (рис. 10.11,*г*).

Увеличение радиуса приводит к приращению меридионального напряжения на величину $\Delta\sigma_{\rho 7}$. Из геометрических соотношений и равенства моментов сил, действующих относительно точки O, определим необходимые соотношения:

$$z = R_{\rho 3} - R_{\rho 3}\cos\alpha_2 - \frac{S}{2}, \rho_4 = R_d - z - \frac{S}{2}.$$

Длина плеча h выразится формулой

$$h = R_{\rho 3}[\sin\alpha_2 + \sin(\delta - \alpha_2)].$$

Сила, вызывающая изгибающий момент,

$$dT = 2\sigma_\theta \sin\frac{d\gamma}{2} S R_{\rho 3} d\delta.$$

По аналогии с анализом предыдущей стадии получим

$$M_{\sigma\theta} = 2\int_0^{\alpha_2} R_{\rho 3}[\sin\alpha_2 + \sin(\delta - \alpha_2)]\sigma_\theta \sin\frac{d\gamma}{2} S R_{\rho 3} d\delta, \qquad (10.14)$$

$$R_{\rho 3}=\sqrt{\frac{S(\rho_3+\rho_4)}{4(\alpha_2\sin\alpha_2+\cos\alpha_2-1)}}, \tag{10.15}$$

$$\Delta\sigma_{\rho 7}=-\frac{b\sigma_i S}{4R_{\rho 3}}. \tag{10.16}$$

С учетом изложенного формула (10.2а) может быть представлена в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned}
&\sigma_{\rho\Sigma}=-2b\sigma_i\left(1+f\operatorname{ctg}\alpha\right)\left(1-\sqrt{\frac{\rho_1}{R_0}}\right)+\sum_{i=2}^{7}\Delta\sigma_{\rho i}\sqrt{\frac{\rho_1}{R_0}};\\
&\sum_{i=2}^{7}\Delta\sigma_{\rho i}=-\frac{2b\sigma_i\sin\left(\alpha_2-\alpha_1\right)}{\sqrt{8\left(2\frac{R_{\text{м}}}{S}-\cos\alpha_1+\sin\alpha_1\operatorname{tg}\frac{\alpha_2-\alpha_1}{2}\right)}}+\sum_{i=4}^{7}\Delta\sigma_{\rho i};\\
&\sum_{i=4}^{7}\Delta\sigma_{\rho i}=-2b\sigma_i\left(1+f\operatorname{ctg}\alpha\right)\left(1-\sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_2}}\right)+\sum_{i=6}^{7}\Delta\sigma_{\rho i}\sqrt{\frac{\rho_3}{\rho_2}};\\
&\sum_{i=6}^{7}\Delta\sigma_{\rho i}=-\frac{b\sigma_i S}{4}\left(\frac{1}{R_{\rho 2}}+\frac{1}{R_{\rho 3}}\right).
\end{aligned} \tag{10.17}$$

Полученное решение основано на принятии гипотезы идеальной пластичности и не учитывает деформационное упрочнение.

Учесть его в данном решении можно по среднему значению интенсивности напряженного состояния, определяемому по аналитическим аппроксимациям диаграмм «σ_i – ε_i» и, в частности, с использованием аппроксимации вида $\sigma_i=\sigma_{i0}+E_{\text{к}}/2\left(1-\rho_i/R_0\right)$, где σ_{i0} – экстраполированный предел текучести; $E_{\text{к}}$ – касательный модуль. Некоторые трудности возникают при определении числового параметра $E_{\text{к}}$, так как существует зависимость $E_{\text{к}}=E_{\text{к}}\left(\rho_i/R_0\right)$, отражающая влияние степени деформации на интенсивность упрочнения. Поэтому в качестве варианта предлагается расчет интенсивности напряженного состояния σ_i путем совместного решения уравнений по определению характеристики вида напряженного состояния ν_σ и приближенного условия пластичности, т. е.

$$\nu_\sigma=\frac{2\sigma_{\rho i}-\sigma_\theta}{-\sigma_\theta},\ \sigma_\theta=-b\sigma_i.$$

Отсюда

$$\sigma_i=2\frac{\sigma_{\rho i}}{b(\nu_\sigma-1)}, \tag{10.18}$$

где $\nu_\theta=\nu_\varepsilon(1>\nu_\sigma>0)$ для изотропного материала.

Зависимость (10.18) позволяет рассчитать значение σ_i после проведения любой предшествующей стадии обжима по известным на этой стадии значениям $\sigma_{\rho i}$ и $\nu_{\sigma i}$. Числовые значения ν_σ принимаются равными, установленным в результате выполненного исследования (см. рис. 10.6 и 10.10). Таким способом учитывается деформационное упрочнение металла на предыдущей стадии, начиная с первой.

Усилие обжима в ступенчатой конической матрице с учетом разложения сил по направлениям ρ и h на ее входе определяется по формуле

$$P = 2\pi R_{\text{вх}} S_{\text{вх}} \frac{\sigma_{\rho\Sigma}}{\cos\alpha}, \qquad (10.19)$$

где $\sigma_{\rho\Sigma}$ – определяется по (10.17); $R_{\text{вх}}$, $S_{\text{вх}}$ – радиус и толщина стенки заготовки на входе в очаг пластической деформации. При малых углах конусности $\alpha_1 (\alpha_1 < 10^\circ)$ можно принять $\cos\alpha \approx 1$.

10.3. Технологические особенности процесса продольного обжима тонкостенных заготовок в матрицах с криволинейной образующей

Следует различать два основных варианта этого способа обжима: заготовки трубной, открытого типа и заготовки полой с дном, полузакрытого типа. По второму варианту обжим может выполняться со стороны открытого или закрытого торца, т.е. дна заготовки. По обоим вариантам возможен одновременный обжим с двух торцев.

Независимо от вида заготовки обжим открытого торца практически не отличается. На рис. 10.2 показан пример обжима трубной заготовки в матрице с криволинейной образующей и подпорами по наружной и внутренней поверхностям заготовки, предложенный авторами для изготовления пульной оболочки с отверстием в вершине [2]. Такой процесс имеет определенные преимущества перед традиционными, применяемыми в заводской практике: высокий коэффициент использования металла и значительно меньшая трудоемкость изготовления.

10.3.1. Обжим открытого торца полой цилиндрической заготовки

В отличие от обжима в конической матрице при обжиме в матрице с криволинейной образующей радиусы кривизны в меридиональных R_ρ и широтных R_a сечениях являются функциями координат (α, ρ), где ρ – расстояние от оси симметрии; α – угол наклона касательной к срединной поверхности заготовки в точке с координатой ρ к оси симметрии (рис. 10.12) при обжиме в конической матрице ($R_\rho = \infty$), так как образующая матрицы будет прямолинейной. Поэтому из уравнения равновесия сил, спроецированных на направление нормали к срединной поверхности заготовки, следует [3]:

$$\frac{\sigma_n}{S} = \frac{q}{S} = -\frac{b\sigma_\theta}{R_\theta} \qquad (10.20а)$$

– для конической матрицы (σ_ρ/R_ρ);

$$\frac{\sigma_n}{S} = \frac{q}{S} = \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} - \frac{b\sigma_i}{R_\theta} \qquad (10.20б)$$

– для матрицы с криволинейной образующей ($R_\rho \neq \infty$), где q – контактное давление, следовательно, силы трения на контактных поверхностях будут больше при обжиме в матрице с криволинейной образующей, чем при обжиме в конической матрице при равных значениях R_a. Форма ОПД определена кривизной матрицы.

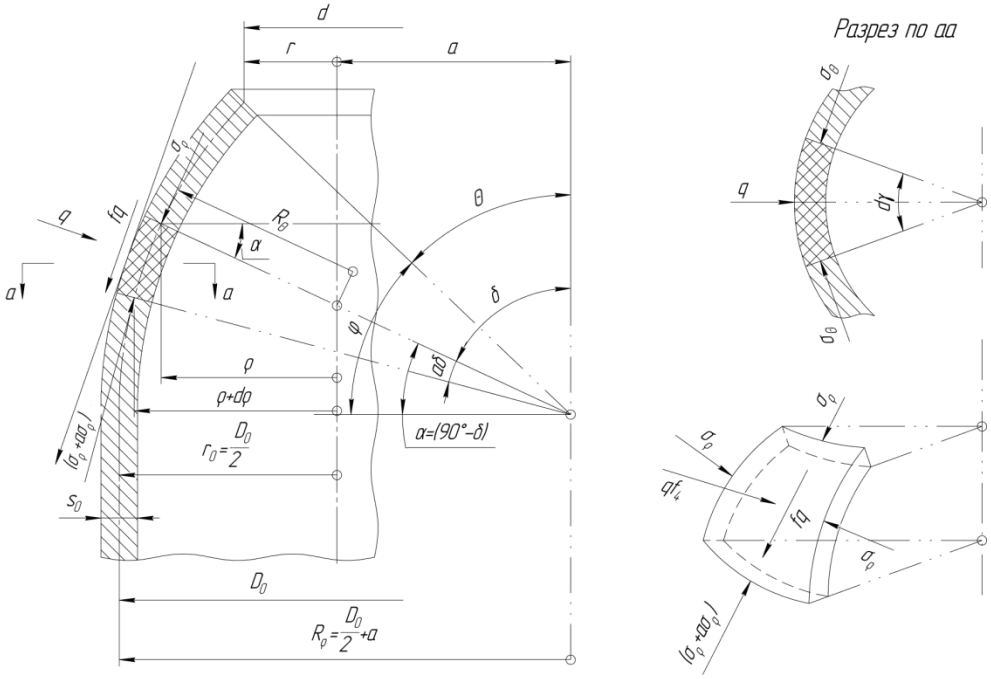


Рис. 10.12. Схема процесса обжима в матрице с криволинейной образующей

При анализе напряженного состояния и силовых параметров процесса применяют метод совместного решения уравнений равновесия, пластичности и условия несжимаемости с учетом следующих известных допущений:

- процесс деформации протекает монотонно;
- материал заготовки изотропен и идеально пластичен;
- оболочка считается осесимметричной тонкостенной, поэтому нормальное, касательное и тангенциальное напряжения по толщине стенки распределены равномерно и зависят только от координаты ρ (или α);

• силы трения, действующие на поверхности контакта заготовки с матрицей, подчиняются закону Кулона.

В силу принятых допущений уравнения равновесия материального элемента, выделенного в пространственной оболочке, без учета изменения толщины стенки, при проецировании сил на нормаль и касательную к срединной поверхности с учетом условия пластичности имеют вид

$$\sigma_\theta = -b\sigma_i\,, \tag{10.21}$$

$$\rho\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho + b\sigma_i - \frac{fq\rho}{S\cdot\sin\alpha} = 0\,. \tag{10.22}$$

В уравнении (10.22) уголα и радиус ρ являются зависимыми переменн ыми, определяющими координаты рассматриваемого элемента заготовки при R_ρ = const. Из геометрических соотношений (см. рис. 10.12) следует

$$\rho = R_\theta\cos\alpha\,; \tag{10.23а}$$

$$\rho = R_\rho\cos\alpha \pm \alpha\,. \tag{10.23б}$$

Знак "-" в (10.23б) соответствует случаю со смещенным в большую сторону, относительно оси заготовки центра кривизны, знак "+" – в меньшую сторону.

После подстановки (10.23) в (10.22) Е.А. Поповым [3] дано приближенное решение задачи по определению максимального меридионального напряжения $\sigma_{\rho\max}$ для частного случая ($\sigma_\rho \cong -\sigma_i$; $R_\rho \cong R_\theta = \frac{\rho}{\cos\alpha}$) в следующем виде:

$$\sigma_{\rho\max} = -\sigma_{i\tilde{n}\eth}\left[\left(1+2f\mathrm{ctg}\frac{\alpha_0}{2}\right)(1-m)+\frac{S}{4R_\rho}\right], \tag{10.24}$$

где $\alpha_0 = \arccos\frac{D_0-d}{2R_\rho}$; $m = \frac{d}{D_0}$ – коэффициент обжима; $\sigma_{i\mathrm{cp}}=f(\varepsilon_{i\mathrm{cp}})$ – среднее по высоте ОПД сопротивление материала деформированию; $\varepsilon_{i\mathrm{cp}}$ – средняя по высоте ОПД интенсивность (степень) деформации; D_0, d – средние по толщине стенки диаметры заготовки до и после обжима.

В работе Ю.А. Аверкиева [4] дана оценка напряжений в функциях углов α, δ для более общего случая смещения центра кривизны инструмента и заготовки в большую сторону от оси без учета деформационного упрочнения и с его учетом при аппроксимации зависимости σ_i - ε_i различными функциями (линейными и степенными).

Уравнение равновесия сил, спроецированных на направление касательной, имеет вид

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\delta}+\sigma_\rho\left[\frac{\cos\delta}{(\sin\delta-1+\dfrac{D_0}{2R_\rho}}-f\right]+b\sigma_i\cdot\frac{(\cos\delta+f\sin\delta)}{\left[\sin\delta-1+\dfrac{D_0}{2R_\rho}\right]}=0. \qquad (10.25)$$

Максимальное напряжение $\sigma_{\rho max}$, действующее на границе ОПД и цилиндрического участка заготовки, определяется по формуле

$$\sigma_{\rho\max}=\frac{b\sigma_{i\text{cp}}}{2}\left[1-m+2f\sqrt{(1-m)(4\frac{R_\rho}{D_0}-1+m)}\right](1+\frac{1}{\sqrt{m}}). \qquad (10.26)$$

В (10.26) составляющая $\frac{1}{2}(1+\frac{1}{\sqrt{m}})$ учитывает утолщение стенки при обжиме при аппроксимации зависимости σ_i - ε_i степенной функцией

$$\sigma_{i\text{cp}}=A\varepsilon_{i\text{cp}}^n. \qquad (10.27)$$

Принимаем в соответствии с [1] $A=\sigma_{i\text{cp}}\big/\varepsilon_{iy}^n$, а

$$\varepsilon_{i\text{cp}}\cong\frac{1}{2}\ln\frac{1}{m},$$

где σ_{iy}, ε_{iy} – интенсивность напряжений и деформаций в момент начала локализации (образования шейки) при испытании образцов на растяжение; n – показатель деформационного упрочнения.

Максимальное усилие обжима

$$P=\pi D_0 S_0\sigma_{\rho\max}. \qquad (10.28)$$

Как следует из (10.26)…(10.28), основное влияние на максимальное усилие обжима оказывают следующие технологические факторы: коэффициент обжима m, механические свойства материала исходной заготовки (σ_{iy}, n), относительный радиус кривизны матрицы R_ρ/D_0, условия контактного трения (f) и габаритные размеры заготовки (D_0, S_0).

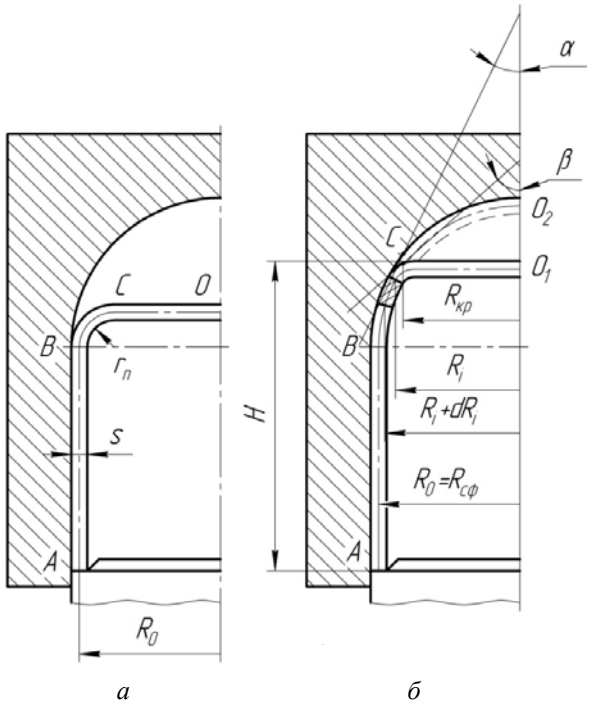
С уменьшением m, увеличением σ_{iy}, n, f усилие возрастает. Опыты показывают, что радиус кривизны матрицы R_ρ при нормальной смазке ($f\cong 0{,}10$) существенного влияния на усилие не оказывает. При большом коэффициенте трение увеличение радиуса R_ρ приводит, при прочих равных условиях, к заметному росту усилия.

10.3.2. Обжим дна (закрытого торца) цилиндрической заготовки

Исходной для этого варианта обжима служит полая цилиндрическая заготовка, получаемая вытяжкой без утонения с последующей обрезкой кромки. Процесс продольного обжима протекает за две основные стадии [5]:

1) деформирование цилиндрической стенки на участке *AB* и придонного участка *BC* (рис. 10.13,*а,б*);

2) деформирование выпучиванием плоского участка дна CO_1 (рис. 10.13,*б*) до контакта с «дном» матрицы.



а *б*

Рис. 10.13. Схема процесса обжима дна полой заготовки

На первой стадии при заталкивании заготовки в матрицу ее цилиндрическая стенка перемещается в криволинейную часть матрицы и изгибается под действием изгибающего момента на входе в нее. Переходной, придонный участок *BC* при этом разгибается и прижимается к криволинейной поверхности матрицы. Донная, плоская часть заготовки *CO* (рис. 10.13,*а*) в начальный момент деформирования несколько уменьшается по диаметру, оставаясь плоской, до величины критического диаметра $D_{кр}=2R_{кр} \cong (0{,}47 \div 0{,}55)D_0$.

На второй стадии при $D \geq D_{кр}$ формообразование дна заготовки происходит за счет выпучивания участка дна CO_1 до контакта с «дном» матрицы на участке CO_2.

С учетом этих особенностей процесса рекомендуется применять исходную полую заготовку, получаемую вытяжкой, с большими относительными радиусами сопряжения стенки и дна r_c/S_0=4…20.

Радиусы назначаются в зависимости от относиельной толщины стенки детали S_0/D_0:

S_0/D_0	<1,5	1,5…2,5	2,5…4,0	>4,0
r_c/S_0	…12…20	8…12	6…8	4…6.

Донную часть исходной цилиндрической заготовки рекомендуется выполнять плоской либо выпуклой с относительным радиусом кривизны $R_{дн}/D_0$ = 2,0…2,5, что облегчает формообразование дна при обжиме.

Технологические схемы обжима и типы деталей, изготавливаемые обжимом, показаны на рис. 10.14 и 10.15. Формообразование деталей может выполняться за одну или несколько операций.

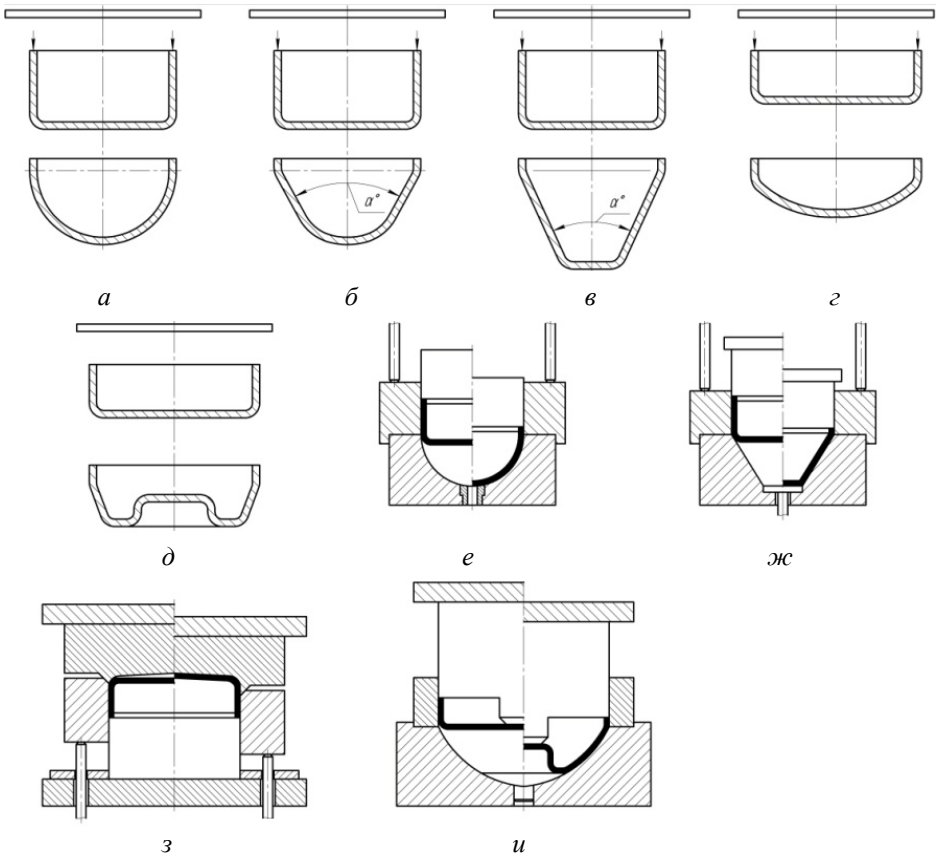


Рис. 10.14.Технологические схемы продольного обжима полой заготовки с дном без подпора стенки заготовки (*а-д*) и конструктивные схемы штампов (*е-и*)

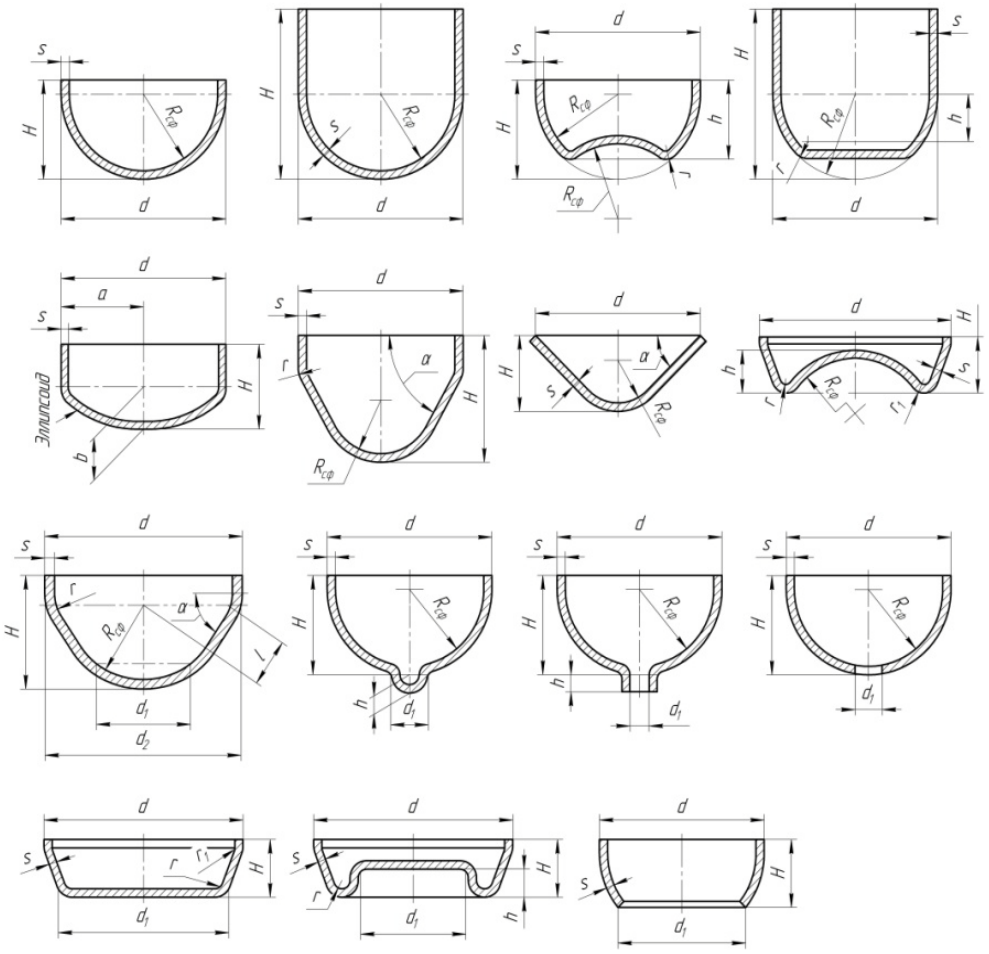


Рис. 10.15. Формы днищ, получаемые продольным обжимом

В табл. 10.2 приведены предельные значения коэффициентов обжима, установленные экспериментом, для конических деталей с односторонним углом конусности α = 15…30°. Для деталей с углами конусности 30…60° рекомендуется повышать значения коэффициентов по сравнению с табличными на 3..5%.

Методика технологических расчетов этого процесса изложена в работе [5].

Таблица 10.2

Предельные значения коэффициентов обжима при формообразовании куполообразных деталей из полых цилиндрических заготовок с дном

Материал	Без подпора стенки заготовки	С односторонним наружным подпором стенки заготовки				С двусторонним подпором стенки заготовки	С двусторонним подпором стенки и дна заготовки
	$h/D = 0 \div 0{,}5$	$h/D = 0{,}15 \div 0{,}50$		$h/D < 0{,}15$		$h/D = 0 \div 0{,}5$	$h/D = 0 \div 0{,}5$
	$(S_0/D)\cdot 100$						
	Св. 8,0	2,0÷8,0	1,2÷2,0	2,0÷8,0	1,2÷2,0	0,7÷1,2	0,3÷0,7
С1	0,40÷0,45	0,25÷0,30	0,40÷0,45	0,20÷0,25	0,40÷0,45	–	–
АД1М	0,68÷0,72 0,50÷0,55	0,53÷0,57 0,20÷0,25	0,53÷0,57 0,40÷0,45	0,53÷0,57 0,15÷0,20	0,53÷0,57 0,35÷0,40	0,27÷0,32 0,25÷0,27	0,22÷0,25
М1	0,55÷0,59	0,20÷0,25	0,40÷0,45	0,15÷0,20	0,35÷0,40	0,25÷0,27	–
АМг3	0,55÷0,60	0,30÷0,35	0,50÷0,55	0,25÷0,30	0,45÷0,50	0,25÷0,28	0,24÷0,27
АМг6	0,59÷0,64	0,35÷0,40	0,60÷0,65	0,30÷0,36	0,50÷0,55	0,28÷0,32	0,25÷0,28
Л63	0,48÷0,53	0,18÷0,23	0,30÷0,35	0,13÷0,18	0,25÷0,30	0,22÷0,26	–
08кп	0,52÷0,57	0,30÷0,35	0,60÷0,65	0,19÷0,27	0,50÷0,55	0,26÷0,30	0,26÷0,30
12Х18Н9Т	0,55÷0,60	0,23÷0,28	0,55÷0,60	0,18÷0,26	0,35÷0,40	0,25÷0,28	0,25÷0,28
12Х21Н5Т	0,62÷0,67	0,37÷0,42	0,65÷0,70	0,30÷0,35	0,55÷0,60	0,40÷0,42	0,40÷0,42

10.4. Устойчивость заготовок при обжиме

Из предшествующего анализа напряженного состояния при обжиме (гильз) следует, что в ОПД на всех стадиях процесса действуют только сжимающие напряжения. Следовательно, величина допустимого формоизменения ограничивается возможностью потери устойчивости, а не разрушения. Некоторое исключение составляет шестая стадия процесса (см. рис. 10.11,*б*), при протекании которой происходит спрямление кромки под действием окружных растягивающих напряжений σ_θ и соответствующего момента внутренних сил. При обжиме сильно предварительно наклепанной заготовки на этой стадии возможно разрушение кромки с образованием продольных трещин.

При обжиме в ступенчатой конической матрице можно выделить следующие участки – очаги потери устойчивости: *1* – зона заготовки, передающая усилие; *2* – ОПД в верхней ступени матрицы с углом конусности α_1; *3* – ОПД в нижней ступени матрицы с углом конусности α_2; *4* – обжатая цилиндрическая часть (дульце) заготовки.

Перечисленные очаги потери устойчивости формируются по мере развития процесса обжима от первой к седьмой стадии.

При этом изменяются возможные виды потери устойчивости. Основными из них следует считать, в соответствии с классификацией А.Д. Томленова, второй и третий. Потеря устойчивости второго вида возникает в результате сжатия листа в плоскости его поверхности с появлением складок и объясняется явлениями продольного изгиба. Устойчивость при упругопластическом продольном изгибе пропорциональна модулю упрочнения материала. Потеря устойчивости третьего вида характерна для больших пластических деформаций и сопровождается резкой локализацией деформации при значительном уменьшении объема ОПД. Причина потери устойчивости в этом случае заключается в уменьшении сопротивления элемента заготовки и модуля упрочнения. В свою очередь, локализация служит возмущением, способствующим созданию моментного состояния и появлению складок. В зависимости от стадии процесса обжима, свойств материала изменяются условия и формы потери устойчивости.

На первой стадии, при относительно небольших остаточных деформациях сильно наклепанной до обжима заготовки, в очаге пластической деформации в верхней ступени матрицы может возникнуть потеря поперечной устойчивости третьего вида с образованием продольных складок (гофр), иногда развивающихся в продольные трещины. Вторая и третья стадии (см. рис. 10.4 и 10.10,*б*,*в*) соответствуют области малой упругопластической деформации краевой части заготовки, сформированной в верхней ступени матрицы, при отсутствии ее контакта с матрицей на участке длиной $l_{кр1}$. Такие условия создают возможность появления потери поперечной устойчивости второго вида с образованием продольных складок у кромки. Четвертая и пятая стадии процесса обжима связаны с формированием нового очага больших (конечных) пластических деформаций в нижней ступени матрицы и могут сопровождаться при определенных условиях потерей поперечной устойчивости третьего вида с образованием продольных складок в нижней и (или) верхней ступенях. На пятой и шестой стадиях в формирующейся краевой цилиндрической части заготовки при определенных размерах матрицы и заготовки могут также образоваться продольные складки в результате потери поперечной устойчивости второго вида.

Кроме рассмотренных форм потери устойчивости, на всех стадиях процесса принципиально возможна потеря продольной устойчивости второго вида с образованием поперечных или ромбовидных складок в зоне заготовки, передающей усилие, т.е. находящейся вне матрицы.

При обжиме полых заготовок с дном и повышенной (за счет прочностных свойств и увеличивающейся при перемещении к дну толщины стенки) несущей способностью этот вид потери устойчивости практически не проявляется. Наиболее изучена потеря продольной устойчивости второго вида для равнопрочных заготовок типа тонкостенных цилиндрических оболочек. Природа и механизм образования продольных складок в результате потери попереч-

ной устойчивости второго и третьего видов до недавнего времени были недостаточно исследованы, что затрудняло разработку методики расчета процессов обжима на устойчивость, а также не позволяло предотвратить образование складок. В связи с изложенным основное внимание в этой книге уделено анализу условий поперечной устойчивости тонкостенных заготовок при обжиме.

Как следует из схемы, представленной на рис. 10.10,*в*, на третьей стадии процесса обжима в многоступенчатой матрице в результате изгиба краевой части заготовки образуется участок неприлегания длиной $l_{кр1}$ и радиусом $R_{\rho 1}$ со свободной поверхностью. Для случая продольного обжима в одноступенчатой конической матрице параметры $l_{кр1}$ и $R_{\rho 1}$ приведены в работе Е.А. Попова [3,6]. Длина $l_{кр}$ для тонкостенных заготовок достаточно мала. Так, например, при S_0 = 0,5 мм, D_0 = 50 мм и $\alpha = 30^\circ$ $l_{кр}$ = 2,7 мм, а $l_{кр} / D_0 << 1$. По известным значениям $l_{кр}$ и R_ρ можно определить значение окружной деформации на кромке заготовки к моменту начала спрямления:

$$\varepsilon_\theta = \sqrt{\frac{S_0}{D_0}}\left(\operatorname{tg}\frac{\alpha}{4} + 0{,}75\sin\alpha \right). \qquad (10.29)$$

Анализ выражения (10.29) показывает, что для сравнительно тонкостенных заготовок значение ε_θ не превышает 0,3.

Экспериментальные исследования показали, что при некотором (критическом) соотношении между S_0/D_0 и α начальный период сопровождается потерей устойчивости заготовки в зоне участка неприлегания (рис. 10.16). Дальнейшее деформирование в этих случаях приводит к увеличению амплитуды волн – интенсивному складкообразованию. У разностенных заготовок потеря устойчивости происходит в месте наименьшей толщины. В геометрическом отношении краевая часть заготовки в момент потери устойчивости представляет собой короткую оболочку высотой $l = l_{кр}$ с криволинейной образующей, ограниченную с одной стороны свободной кромкой, с другой – линией контакта с матрицей (см. рис. 10.10,*в*). Условие потери устойчивости в зоне ОПД, являющееся условием ограничения деформации первого вида, в общем виде можно записать следующим образом:

$$\sigma_\theta \geq \sigma_{кр}. \qquad (10.30)$$

Кромка заготовки находится в условиях, близких к линейному сжатию, поэтому значение тангенциального сжимающего напряжения σ_θ равно пределу текучести материала, как это следует из условия пластичности, и может быть определено по известному значению $\varepsilon_i = \varepsilon_\theta$ из диаграммы «$\sigma_i - \varepsilon_i$».

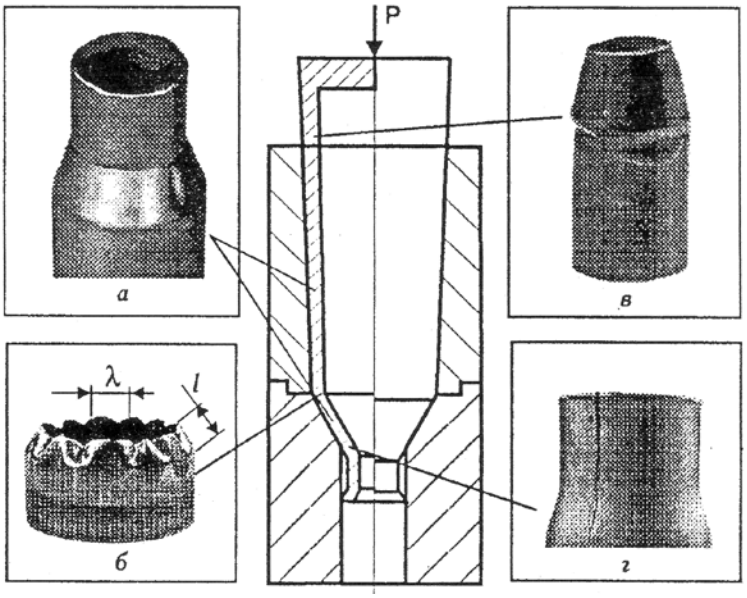


Рис. 10.16. Очаги и виды потери устойчивости при обжиме в ступенчатой конической матрице: *а* – продольная складка третьего типа; *б* – продольная складка второго типа; *в* – поперечная складка второго типа; *г* – продольная трещина

Для определения $\sigma_{кр}$ необходимо решать соответствующую данным условиям нагружения задачу теории устойчивости. Однако сложная геометрия рассматриваемой оболочки, неопределенные граничные условия в месте контакта с матрицей, а также необходимость учета пластических деформаций, предшествующих потере устойчивости, приводят к необходимости ввести ряд допущений относительно формы оболочек и условий закрепления краев. Известно, что существенным признаком, отражающим всю совокупность условий нагружения при потере устойчивости, является характер волнообразования. В рассматриваемом случае потеря устойчивости заготовки (при отсутствии разностенности) сопровождается образованием весьма большого количества волн. Исследованиями установлено, что длина одной полуволны λ (см. рис. 10.16) примерно равна высоте оболочки $l = l_{кр}$, но много меньше диаметра, т. е. $\lambda / D_0 << 1$. Равенство $\lambda = l$ является признаком того, что в месте контакта с матрицей условия закрепления близки к жесткой заделке. Малая относительная длина полуволны λ / D_0 позволяет использовать принцип так называемой локальной устойчивости, который применяется при исследовании устойчивости пологих оболочек малого прогиба. В данном случае в качестве расчетной схемы можно вместо короткой оболочки рассматривать ее часть (в пределах нескольких полуволн) в виде удлиненной

пластинки шириной l, нагруженной вдоль коротких сторон сжимающим напряжением σ_θ. Один край пластинки свободен, другой жестко защемлен. Теория устойчивости пластин за пределом упругости разработана достаточно полно. Существует ряд решений, полученных на основе деформационной теории и теории течения с использованием различных критериев устойчивости (статического и динамического) как с учетом, так и без учета эффекта разгрузки. По-видимому, наиболее строгим является решение А.А. Ильюшина.

В рассматриваемом случае можно воспользоваться менее строгой формулой Джерарда, которая позволяет значительно упростить анализ и получить решение в замкнутом виде:

$$\sigma_{кр} = k_з \frac{\pi^2 E_c}{12\left(1-\mu^2\right)}\left(\frac{S}{l}\right)^2, \qquad (10.31)$$

где $k_з$ – коэффициент, характеризующий условия закрепления краев ($k_з$ =1,33); $l = l_{кр1}$ – ширина пластины, определяемая по длине участка неприлегания на 3-й стадии процесса; E_c – секущий модуль; μ – коэффициент Пуассона.

Условие потери устойчивости этого вида (10.30) может быть выражено в деформациях, т. е.

$$\varepsilon_\theta \geq \varepsilon_{кр}, \qquad (10.32)$$

где ε_θ определяется из (10.29), а $\varepsilon_{кр}$ – из (10.31):

$$\varepsilon_{кр} = \frac{\sigma_{кр}}{E_c}. \qquad (10.33)$$

После подстановки в (10.32) выражений (10.29), (10.33) и μ = 0,5, а также принимая во внимание установленное экспериментально влияние на устойчивость относительной разностенности $\delta_S = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{ср}}$ (S_{max}, S_{min}, $S_{ср}$ – максимальная, минимальная и средняя толщина стенки) исходной заготовки, после несложных преобразований получаем условие потери поперечной устойчивости второго вида, выраженное в относительных толщинах обжимаемой заготовки:

$$S/D \leq \left(S/D\right)_{кр}, \qquad (10.34)$$

где S, D – толщина стенки и диаметр кромки заготовки после начальной стадии обжима и искривления краевой части (с учетом малой деформации можно принять $S = S_0$, $D = D_0$); $\left(S/D\right)_{кр}$ – критическое значение относительной толщины, сопровождаемое потерей устойчивости.

Критическое значение определено из условия равенства ε_θ (10.29) и $\varepsilon_{кр}$

(10.33) с учетом влияния разностенности [1,2,6]:

$$\left(\frac{S}{D}\right)_{\text{кр}} = \frac{k_{\text{н}}}{1-\delta_S/2}\left(0{,}125\,\text{tg}\alpha + \frac{\text{tg}\dfrac{\alpha}{2}}{6\cos\alpha}\right)^2, \qquad (10.35)$$

где $k_{\text{н}}$ – эмпирический коэффициент, учитывающий неравномерность пластической деформации по периметру заготовки (при $\delta_S = 0$; 0,1; 0,2; 0,3 соответственно $k_{\text{н}} = 1$; 1,02; 1,05; 1,15).

Экспериментально (10.34) и (10.35) проверялись обжимом отожженных и упрочненных трубчатых заготовок из алюминия АД1-М, нержавеющей стали ОХ18Н10Т, латуни Л62 и стали 10 с относительными толщинами 0,005…0,02 в конических матрицах с различными углами конусности α при $\delta_S \le 0{,}05$.

Результаты эксперимента приведены на рис. 10.17 и свидетельствуют о хорошей сходимости с теоретической кривой (сплошная линия). Темными значками обозначены случаи обжима, сопровождающиеся потерей устойчивости, светлыми – без потери устойчивости.

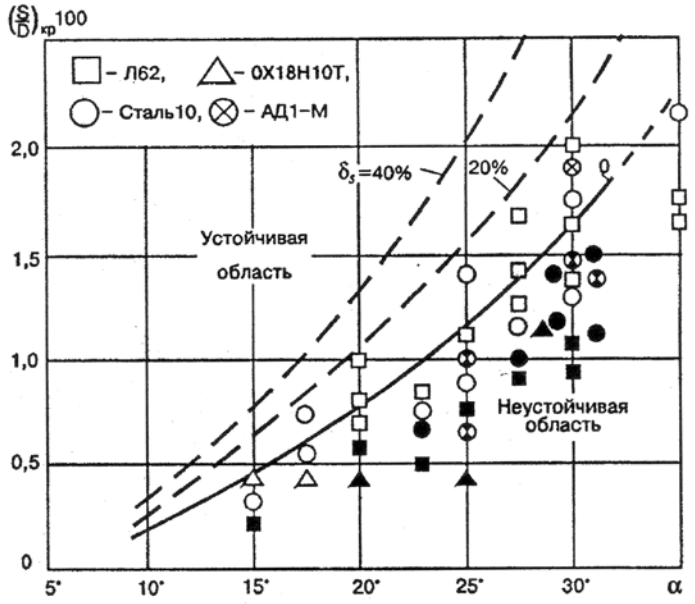


Рис. 10.17. Зависимость критической относительной толщины стенки заготовки при обжиме $(S/D)_{\text{кр}}$ от угла конусности матрицы α и относительной разностенности δ_s заготовки

Из анализа выражений (10.34), (10.35) следует, что основными параметрами, влияющими на устойчивость заготовки в зоне ОПД в начальный период обжима, являются относительная толщина исходной заготовки S_0/D_0, угол

конусности матрицы α и относ ительная разностенность исходной заготовки δ_S; с уменьшением относительной толщины и увеличением угла конусности и разностенности устойчивость заготовки уменьшается; механические свойства материала исходной заготовки не оказывают существенного влияния на устойчивость заготовки в этот период.

Устойчивость заготовки обеспечивается только при условии, что совокупность значений S_0/D_0, δ_S и α лежит в устойчивой области, в противном случае начальный период будет сопровождаться потерей устойчивости и образованием продольных складок в зоне кромки (см. рис. 10.16,*б*). Следует учесть, что параметр разностенности в (10.35) является случайной величиной и подчиняется, как установлено авторами, нормальному закону распределения. С учетом этого можно принимать $\delta_S = \bar{\delta}_S \pm 3S_{\text{отк}} = \bar{\delta}_S(1 \pm 3\nu)$, где $\bar{\delta}_S$ – математическое ожидание; $S_{\text{отк}}, \nu$ – среднеквадратичное отклонение выборки и коэффициент вариации соответственно. Статистические исследования показали, что $\delta_S = 0{,}10...0{,}30$ в зависимости от вида исходных заготовок (трубные или штампованные, калиброванные или некалиброванные).

В технологических расчетах следует принимать не критическое, а допустимое значение относительной толщины:

$$\left(\frac{S}{D}\right)_{\text{доп}} = k_{\text{уст}}\left(\frac{S}{D}\right)_{\text{кр}}, \qquad (10.36)$$

где $k_{\text{уст}}$ = 2…4 – коэффициент запаса устойчивости, учитывающий несовершенство формы исходной заготовки и наличие слабо выраженных дефектов (большие значения для заготовок средних и больших габаритов). При обжиме в ступенчатой конической матрице критическое значение относительной толщины определяется по следующему соотношению:

$$\left(\frac{S}{D}\right)_{\text{кр}} = \frac{k_{\text{н}}}{1-\frac{\delta_S}{2}}\left[0{,}125\,\text{tg}(\alpha_2-\alpha_1)+\frac{\text{tg}\frac{\alpha_2-\alpha_1}{2}}{6\cos(\alpha_2-\alpha_1)}\right]^2. \qquad (10.37)$$

С момента спрямления краевой части начинается пятая стадия контактной деформации (см. рис. 10.10,*а*), с начала которой до завершения процесса обжима происходит основное формоизменение заготовки.

На пятой стадии возможны потери продольной и поперечной устойчивости заготовки. Потеря продольной устойчивости выражается в образовании поперечных складок, как правило, в зоне заготовки, передающей усилие (первый очаг потери устойчивости), т.е. в корпусной части детали. При малых относительных толщинах заготовок возникает так называемая упруго-

пластическая несимметричная форма потери устойчивости и образуются ромбовидные складки, при средних и больших относительных толщинах – упругопластическая симметричная форма (симметричное кольцевое выпучивание).

Условие потери продольной устойчивости имеет вид

$$\sigma_{\rho\max} \geq \sigma_{кр}, \tag{10.38}$$

где $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение, определяемое для зоны опасного сечения.

Значения критических напряжений могут быть определены по следующим соотношениям теории устойчивости цилиндрических тонкостенных оболочек:

$$\sigma_{кр} = \frac{4}{3} E_{с} \frac{S_0}{D_0} \sqrt{\frac{E_{к}}{E_{с}}} \sqrt{\frac{2 + \sqrt{1 + 3\frac{E_{к}}{E_{с}}}}{3\frac{E_{к}}{E_{с}} - 1 + \sqrt{1 + 3\frac{E_{к}}{E_{с}}}}} \tag{10.39а}$$

– для заготовок с малыми относительными толщинами при несимметричном выпучивании;

$$\sigma_{кр} = \frac{4}{3} \frac{S_0}{D_0} \sqrt{E_{к} E_{с}} \tag{10.39б}$$

– со средними относительными толщинами $\left(\frac{S_0}{D_0} 100 > 2{,}5...3{,}0 \right)$ и для симметричной формы потери устойчивости, где $E_{с}$, $E_{к}$ – секущий и касательный модули, определяемые по диаграмме «$\sigma_i - \varepsilon_i$» для области малых упругопластических деформаций.

Критические напряжения превышают предел пропорциональности материала и, в частности, для заготовок со средней и большой относительными толщинами могут приниматься равными пределу текучести $\sigma_{0,2}$.

Приведенные формулы (10.39) для определения критических напряжений получены для идеальных оболочек и не учитывают в реальных заготовках начальные геометрические неправильности формы и несовершенства поверхности: осесимметричные выпучины (волны), продольные выпучины (волны), направленные вдоль образующей цилиндра, разностенность, овальность и т.п., а также колебания толщины и механических свойств материала. Все эти изменения носят случайный характер. Экспериментальными исследованиями доказано, что начальные геометрические неправильности формы значительно ухудшают устойчивость оболочек. Доказано, что неправильность формы с амплитудой, составляющей только 0,1 толщины стенки оболочки, приводит к 40%-ному уменьшению ее несущей способности. В про-

цессе нагружения наблюдается рост неправильностей как в осевом, так и в окружном направлении. При этом наиболее быстро растущая неправильность (выпучина в поперечном направлении) является основной причиной уменьшения критического напряжения и нагрузки. Снижение критических напряжений $\sigma_{кр}$ вызывают и такие факторы, как условия закрепления края заготовки (наличие дна, защемление заготовки), однако их влияние незначительно, и в условиях упругих деформаций они снижают ожидаемые значения критических нагрузок не более чем на 10…15%.

Потеря устойчивости в окружном направлении выражается в появлении продольных складок от действия окружных сжимающих напряжений, причем природа их возникновения принципиально отличается от возникновения продольных складок в начальной стадии обжима. В этом случае между заготовкой и матрицей нет зазора, а сжимающие окружные напряжения уравновешиваются реакцией матрицы. Таким образом, при малых отклонениях заготовка устойчива и будет находиться в безмоментном, а следовательно, устойчивом состоянии, выйти из которого без дополнительных возмущений не может. Экспериментальные наблюдения подтверждают этот вывод: обжим весьма тонкостенных заготовок, прошедших отжиг, при относительно небольших деформациях протекает устойчиво. Однако при обжиме заготовок из предварительно наклепанного материала или отожженных заготовок при больших степенях деформации (с подпорами в зоне передачи усилия) потеря устойчивости на этой стадии возможна.

Экспериментами авторов установлено, что потеря устойчивости этого вида является следствием локализации пластической деформации в узкой области, проявляющейся в возникновении зон интенсивной сдвиговой деформации, расположенных в плоскости действия максимальных касательных напряжений (рис. 10.18). Эта локализация и является тем «возмущением», которое выводит заготовку из безмоментного состояния. Действительно, в сечениях, непосредственно прилегающих к месту локализации, возникает изгибающий момент, величина которого зависит от интенсивности сдвиговой деформации и эксцентриситета приложения сил (рис. 10.18,*б*).

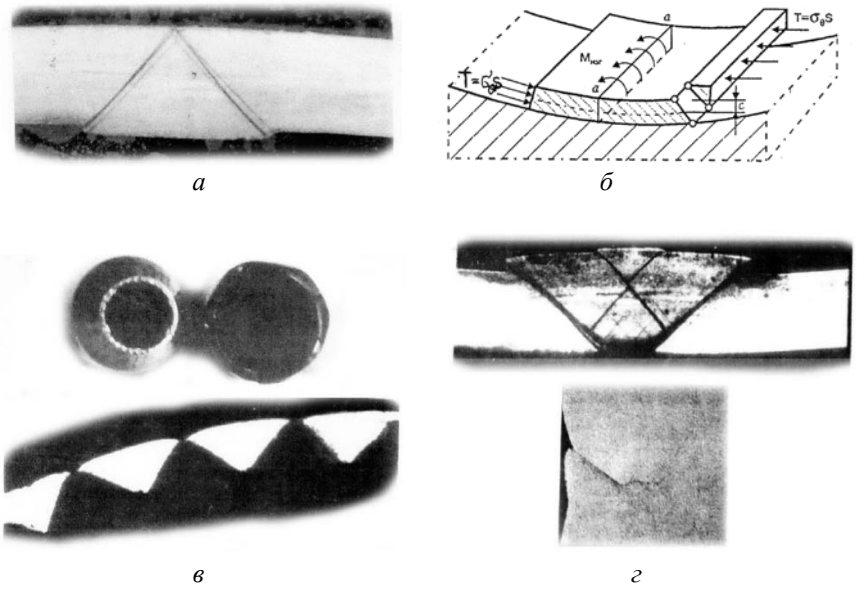
В зависимости от относительной толщины стенки заготовки и степени упрочнения материала (с увеличением степени упрочнения ширина зоны сдвиговой деформации уменьшается) эффект от локализации деформации может быть различным. При реализации условия

$$M_{т} \geq M_{\sigma}^{*} \qquad (10.40)$$

происходит изгиб и образование складок (гофр) (см. рис. 10.18). Здесь $M_{т} = Tc$ – момент, создаваемый окружной (продольной) силой T: $T = \sigma_{\theta}S$; c – эксцентриситет приложения силы T после локализации деформации;

[*] Здесь и далее используются моменты и силы (нагрузки), действующие в окружном (широтном) направлении, отнесенные к единице длины.

$M = \frac{1}{4}\sigma_i S^2$ – момент, создаваемый напряжениями σ_θ.



а *б*

в *г*

Рис. 10.18. Механизм потери устойчивости третьего вида: локализация деформации (*а*, *в*); схема действия сил и моментов в зоне локализации (*б*) ; потеря устойчивости и гофрообразование (*г*)

Принимая согласно уравнению пластичности $\sigma_\theta = -\sigma_i$, условие (10.40) запишем в другом виде:

$$c \geq \frac{1}{4} S. \qquad (10.41)$$

Если материал предварительно сильно упрочнен, то условия складкообразования (10.40), (10.41) могут не выполняться, интенсивность локальной деформации сдвига возрастает до критического значения и происходит разрушение с образованием продольных трещин. Условие разрушения заготовки на этой стадии может быть выражено неравенством

$$e_{i\Sigma} \geq e_{ip}, \qquad (10.42)$$

где $e_{i\Sigma} = e_{i0} + e_{iy} + \Delta e_i$ – суммарная степень деформации; e_{i0} – степень предварительной деформации исходной заготовки; e_{iy} – степень устойчивой деформации (до начала локализации) при обжиме; Δe_i – интенсивность локальной деформации в зоне сдвига.

Оценка локальной деформации сдвига для этого случая дана в работе

И.П. Ренне: $\Delta e_i = 2/\sqrt{3}$.

Предельная до разрушения деформация $e_{i\text{p}}$ есть функция величины $\varepsilon_{i\text{p}}$, определяемой при испытании исходного материала на растяжение, и показателя жесткости схемы напряженного состояния K. Однако в технологических расчетах процессов обжима должна учитываться предельная не до разрушения, а до начала локализации (потери устойчивости третьего вида) деформация. Это условие потери устойчивости получает вид

$$e_i \geq e_{i\text{y}}. \tag{10.43}$$

Природа локализации деформации и потери устойчивости этого вида объяснена [7] с позиций феноменологической теории накопления повреждений в металле и его разрушения. Локализация деформации на этой стадии отвечает переходу деформируемого металла через второе предельное состояние.

Математическое и физическое моделирование процесса обжима по параметру предельной устойчивой деформации $e_{i\text{y}}$ – эффективный путь решения задач как по исследованию, так и по оптимизации процесса с учетом влияния основных технологических факторов. В качестве метода построения математических моделей использован метод активного эксперимента [1]. Физическое моделирование выполнено с помощью метода технологических испытаний плоских образцов на пластическое сжатие, как наиболее полно удовлетворяющего условиям подобия реальному процессу обжима. Математические модели разработаны для сложного технологического цикла «предварительная пластическая деформация–термообработка–окончательная пластическая деформация». Планирование эксперимента проведено по рекомендованной методике. В соответствии с постановкой задачи в качестве функции отклика приняты характеристики интенсивности деформации $\varepsilon_{i\text{y.сж}}$ и напряжений $\sigma_{i\text{y.сж}}$, отвечающие второму предельному состоянию. Ввиду монотонности процесса пластической деформации при испытании на сжатие плоских образцов $e_{i\text{y}} = \varepsilon_{i\text{y.сж}}$.

Для исследования выбранных функций отклика необходимо выявить состав основных управляемых технологических факторов, влияющих на их величину, и определить интервал варьирования каждого из них. Используем уравнения по определению характеристики вида напряженного состояния ν_σ (для плоского напряженного состояния), энергетического условия пластичности и степенной аппроксимации функции $\sigma_i = \Phi(\varepsilon_i)$:

$$\nu_\sigma = 1 - 2\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta};\ \sigma_\theta = -b\sigma_i;\ \sigma_i = A\varepsilon_i^n;\ \sigma_{i\,\text{y}} = A\varepsilon_{i\,\text{y}}^n. \tag{10.44}$$

Из совместного решения уравнений (10.44) вытекает соотношение в виде

функции нескольких переменных, заданных неявно, характеризующее второе предельное состояние:

$$F_{iy}\left(e_{iy}, \sigma_\rho/\sigma_i, \sigma_i/\sigma_{iy}, \nu_\sigma, e_{i0}\right). \quad (10.45)$$

Отсюда

$$e_{iy} = f\left(\sigma_i/\sigma_{iy}, \sigma_\rho/\sigma_i, \nu_\sigma, e_{i0}\right). \quad (10.46)$$

В соответствии с (10.44) $\nu_\sigma = \nu_\sigma\left(\sigma_\rho/\sigma_i\right)$. При этом следует учитывать, что так как моделируется сложный технологический цикл с промежуточной термообработкой, то интенсивность напряжений σ_i есть функция также от степени предварительной деформации e_{i0} и режима промежуточной термообработки (t): $\sigma_i = \sigma_i(e_{i0}, e_i, t)$, где $e_i \le e_{iy}$.

Из анализа условий подобия моделируемых процессов обжима тонкостенных заготовок установлена также необходимость учета масштабного фактора путем варьирования толщины заготовки (образца). Это обстоятельство связано с возможным учетом влияния неоднородности деформации по толщине при изменении относительного размера зерна микроструктуры металла и его структурного подобия соответственно.

На основании анализа режимов обработки, применяемых в существующих технологических процессах изготовления металлических элементов изделий, при планировании эксперимента определены состав и интервалы варьирования числовых значений технологических факторов (табл. 10.3). Для проведения эксперимента выбран стандартный план из 16 опытных точек. Исходные заготовки в виде полос толщиной S получают путем прокатки с последующим полным рекристаллизационным отжигом, травлением в 10%-ном растворе серной кислоты (для снятия окалины) и промывкой.

Таблица 10.3

Уровни и интервалы изменения факторов при исследовании характеристик e_{iy} и σ_{iy}

Условия планирования	Кодовое значение				Натуральное значение															
					Сталь 18ЮА после отжига				Сталь 18ЮА после закалки и отпуска				Биметалл-1				Латунь Л70			
	x_1	x_2	x_3	x_4	S_0, мм	e_{i0}	$\overline{T}$	$\frac{\sigma_\rho}{\sigma_i}$	S_0, мм	e_{i0}	$\overline{T}$	$\frac{\sigma_\rho}{\sigma_i}$	S_0, мм	e_{i0}	$\overline{T}$	$\frac{\sigma_\rho}{\sigma_i}$	S_0, мм	e_{i0}	$\overline{T}$	$\frac{\sigma_\rho}{\sigma_i}$
Уровень фактора:																				
основной	0	0	0	0	1,3	0,75	6	0,4	1,3	0,75	6	0,4	0,8	0,5	5,5	0,4	1,3	0,75	6,5	0,4
верхний	+1	+1	+1	+1	2,1	1,50	9	0,8	2,1	1,50	7	0,8	1,1	1,0	8,0	0,8	2,1	1,50	8,0	0,8
нижний	-1	-1	-1	-1	0,5	0	3	0	0,5	0	5	0	0,5	0	3,0	0	0,5	0	5,0	0
Интервал варьирования	1	1	1	1	0,8	0,75	3	0,4	0,8	0,75	1	0,4	0,3	0,5	2,5	0,4	0,8	0,75	1,5	0,4

Величина предварительной деформации по плану эксперимента также обеспечивается прокаткой в соответствии с соотношением $e_{i0} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{S}{S_0}$, где S_0 – толщина заготовки (образца) для моделируемого процесса обжима.

Габаритные размеры образца установлены из условия геометрического подобия.

Деформирование плоских образцов проводилось по методу технологического испытания на пластическое сжатие.

В качестве постулируемой модели принимается полином второй степени для четырех факторов:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_1 x_2 + b_6 x_1 x_3 + b_7 x_1 x_4 + \\ + b_8 x_2 x_3 + b_9 x_2 x_4 + b_{10} x_3 x_4 + b_{11} x_1^2 + b_{12} x_2^2 + b_{13} x_3^2 + b_{14} x_4^2. \quad (10.47)$$

При проведении эксперимента каждый опыт повторялся четыре раза. Начальный момент потери устойчивости образца фиксировался точечным способом с помощью двухмикрофонного пневмоакустического датчика (рис. 10.19) с множительной насадкой типа «сопло-заслонка».

При построении схемы фиксации складок пневмоакустическим датчиком с насадкой используется волновой характер распространения сигналов по коммуникационным каналам и линейность сопротивления выходных сигналов.

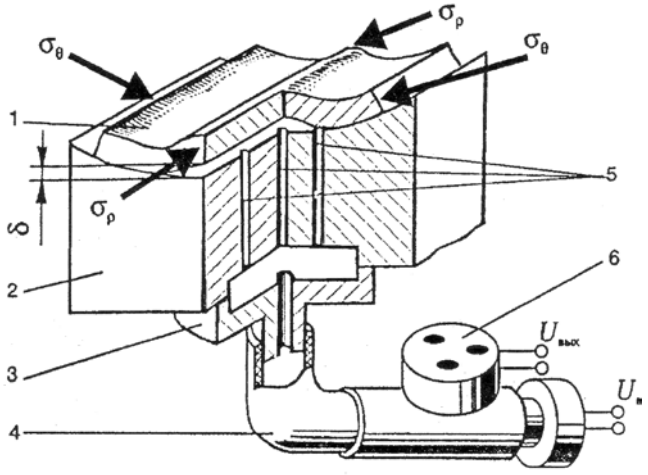


Рис. 10.19. Принципиальная схема устройства для фиксации начала складкообразования

Принципиальная схема фиксации складок (рис. 10.19) включает в себя образец *1*, корпус приспособления *2*, насадку *3*, соединительный гибкий канал *4*, коммуникационные каналы *5* и двухмикрофонный пневмоакустический

датчик *6*. Как видно из рисунка, основная особенность устройства заключается в разветвлении канала датчика полостью, созданной насадкой и корпусом приспособления. В свою очередь полость соединена с несколькими коммуникационными каналами, которые закрыты исследуемой поверхностью заготовки (образца). Количество этих каналов зависит от площади контролируемой поверхности образца. Способ фиксации момента начала складкообразования включает в себя измерение величины появляющегося при этом зазора δ между искривляющейся поверхностью заготовки *1* и поверхностью корпуса. Появление зазора приводит к изменению параметров стоячей звуковой волны (амплитуды и фазы колебаний) в образованном между датчиком и заготовкой канале. Звуковая волна создается с помощью генератора сигналов низкой частоты Г3-120. Появление зазора приводит также к уменьшению энергии отраженной волны, а в месте установки второго (приемного) микрофона – к повышению амплитуды давления и одновременно выходного напряжения, изменение которого фиксируется числовым вольтметром В7-22А и служит сигналом появления складок.

Экспериментальное определение параметров НДС образцов осуществлялось с применением метода делительной сетки. Математическая обработка результатов экспериментов, включающая оценку построчных дисперсий, проверку их однородности, определение коэффициента уравнений регрессии методом наименьших квадратов, позволила получить в соответствии с формулой (10.47) модели зависимости характеристик e_{iy} и σ_{iy} от технологических факторов (табл. 10.4).

После получения численных значений коэффициентов уравнения регрессии была оценена их значимость и качество моделей в целом. Результаты этой оценки: коэффициенты множественной корреляции находятся в интервале значений от 0,88 до 0,98; доля объясненной вариации составляет от 89 до 98,7%; стандартная ошибка – от 5,5 до 6,4%, что свидетельствует о достаточно высоком качестве моделей.

Т а б л и ц а 10.4

Значения коэффициентов в формуле (10.47)

Материал, обработка	Характеристика	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}
Сталь 18ЮА, отжиг	e_{iy}	0,07	0,51	0,04	-0,05	-0,15	-0,03	0,01	0,03	0,02	-0,12	0,03	-0,15	-0,04	0,005	-0,03
	σ_{iy}	48,59	9,76	40,14	-3,4	-17,32	-5,46	0,31	2,99	0,23	0,86	0,88	-1,35	-13,08	0,20	7,01
Сталь 18ЮА, закалка – отпуск	e_{iy}	1,82	0,78	0,05	-0,55	0	-0,01	0	-0,03	0	-0,07	0	-0,20	0	0,06	0,06
	σ_{iy}	39,67	5,14	47,62	-1,29	-10,64	-6,55	1,04	0	0	0	0	0	-14,81	0	12,04

Биметалл-1, отжиг	e_{iy}	-0,24	0,24	-0,51	0,04	0,19	-0,06	0,04	-0,39	0,02	-0,06	-0,06	0	0,44	-0,01	0,29
	σ_{iy}	56,24	0	79,19	-8,87	14,51	-13,13	2,65	-20,95	-1,79	4,51	-2,33	7,43	-25,34	0,76	10,83
Латунь Л70, отжиг	e_{iy}	1,14	0,68	0,21	-0,33	-0,21	-0,02	-0,04	0,03	-0,02	-0,06	0,05	-0,11	-0,01	0,03	-0,11
	σ_{iy}	-40,39	28,47	110,6	17,57	0	-3,44	-1,89	6,41	-5,14	-4,12	2,99	-3,44	10,81	-1,39	28,03

На основании расчета на ЭВМ по полученным моделям – формуле (10.47) и табл. 10.4 – построены графики зависимости предельной устойчивой деформации e_{iy}, отражающие комплексное влияние основных технологических факторов для сложного технологического цикла обработки «пластическая деформация–отжиг–пластическое сжатие» (рис. 10.20–10.23). Анализ графиков для стали 18ЮА показал, что все факторы существенно влияют на характеристики предельного состояния. Так, увеличение толщины образцов от 0,5 до 1,4 мм приводит к возрастанию e_{iy} в 2,0…2,5 раза. При дальнейшем увеличении толщины до 2,0 мм интенсивность роста e_{iy} замедляется.

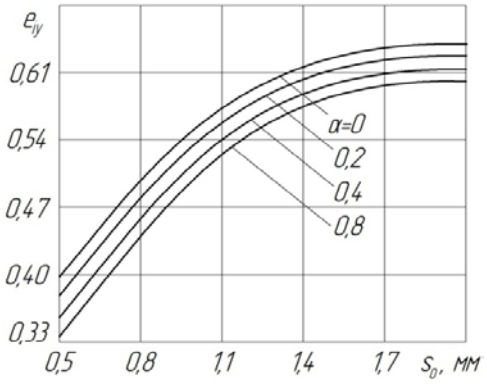


Рис. 10.20. Зависимость предельной устойчивой деформации e_{iy} от толщины S_0 заготовки при e_{i0} = 1,0 и $t_{отж}$ = 860˚С

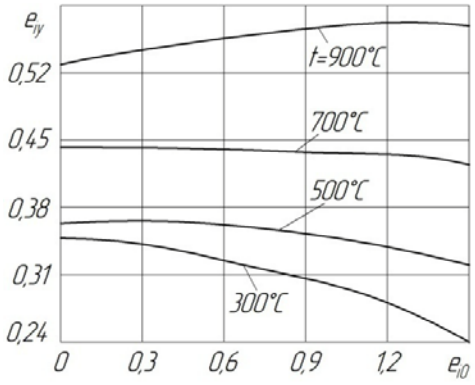


Рис. 10.21. Зависимость предельной устойчивой деформации e_{iy} от степени предварительной деформации e_{i0} при S_0 = 1 мм и $\sigma_\rho/\sigma_\theta$ = 0,5

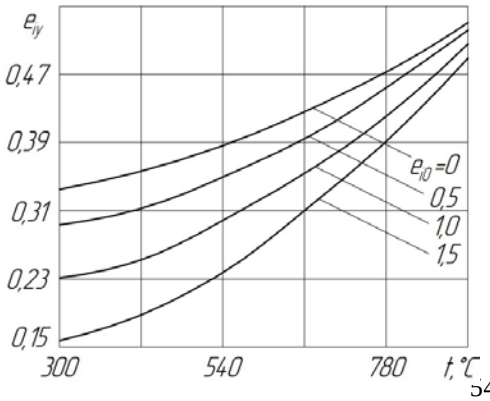


Рис. 10.22. Зависимость предельной устойчивой деформации e_{iy} от температуры промежуточного отжига $t_{отж}$ при S_0 = 1 мм и $\sigma_\rho/\sigma_\theta$ = 0,8

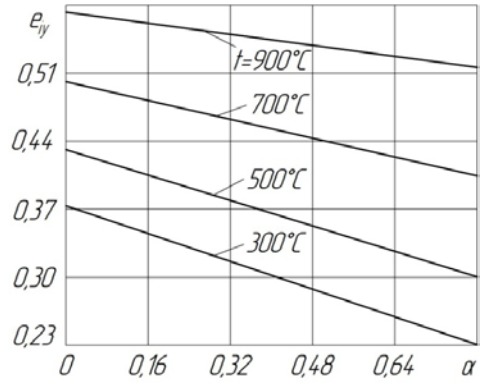


Рис. 10.23. Зависимость предельной устойчивой деформации e_{iy} от соотношения главных напряжений $\alpha=\sigma_\rho/\sigma_\theta$ при S_0 = 1 мм и e_{i0} = 1,0

Это можно объяснить большой неоднородностью деформации при малых толщинах заготовки ввиду проявления анизотропии свойств (размер зерна становится соизмеримым с толщиной заготовки, параметр $d_з / S_0$ стремится к единице). Наоборот, увеличение толщины заготовки сопровождается уменьшением $d_з/S_0$ и повышением однородности деформации по толщине. Увеличение степени предварительной деформации, как правило, приводит к уменьшению e_{iy}, что связано с уменьшением ресурса пластичности металла, причем интенсивность уменьшения зависит от режима термообработки. Так, с увеличением e_{i0} от 0 до 1,5 при температуре промежуточного отжига t = 300…500ºС e_{iy} уменьшается в 1,5…2 раза. При температуре отжига t = 700ºС величина предельной устойчивой деформации изменяется незначительно, а при t = 900ºС возрастает с увеличением e_{i0}. Последнее связано с полным протеканием процесса рекристаллизации в металле и формированием благоприятной равномерной мелкокристаллической ферритно-перлитной структуры. Изменение отношения главных нормальных напряжений $\alpha_\sigma = \sigma_\rho / \sigma_i$ от 0,8 до 0 связано с изменением характеристики вида напряженного состояния от –0,6 до +1 и сопровождается увеличением e_{iy}.

Изменение вида материала несущественно влияет на качественный характер отмеченных закономерностей. Некоторое отличие отмечено для латуни Л70 и выражается в уменьшении e_{iy} примерно в два раза при увеличении температуры промежуточного отжига от 500 до 800ºС. Эта особенность св язана, по-видимому, с формированием крупнокристаллической, возможно неоднородной, структуры латуни при протекании процессов вторичной и собирательной рекристаллизации. Подтверждением тому служит образование при потере устойчивости этого вида характерного рельефа поверхности типа «апельсиновой корки».

На рис. 10.24 показаны характерные виды брака гильз, являющегося следствием потери устойчивости пластического деформирования в зоне ОПД, т.е. третьего вида.

Рис. 10.24. Характерные виды брака гильз

Модель (10.47) позволяет качественно и количественно оценить влияние основных технологических факторов на потерю устойчивости этого вида, за исключением влияние разностенности в поперечном сечении исходной заготовки, получаемой на вытяжке с утонением (абсолютная разностенность $\Delta S_{\max} = S_{\max} - S_{\min}$, относительная разностенность $\delta_S = \Delta S_{\max} / S_{\text{ср}}$, где $S_{\max}$, $S_{\min}$, $S_{\text{ср}}$ – максимальная, минимальная и средняя толщина стенки заготовки в сечении) и угла конусности матрицы α. Косвенно влияние угла конусности матрицы учтено в модели (10.41) параметром $\sigma_\rho / \sigma_\theta$, с увеличением угла конусности его значение возрастает и соответственно уменьшается значение предельной до потери устойчивости деформации. Выполненные статистические исследования показали, что относительная разностенность заготовок после вытяжки с утонением находится в пределах $\delta_S = 5\ldots30\%$.

Выполненные экспериментальные исследования методом активного планируемого эксперимента по обжиму стальных гильз 5,45-мм калибра позволили, например, получить модель параметра дефектности по складкам (гофрам) в зоне ОПД следующего вида:

$$Y = \frac{n_{\text{скл}}}{n_{\text{выб}}} = 0{,}33 + 0{,}55\delta_S - 0{,}14m, \qquad (10.48)$$

где $n_{\text{скл}}$, $n_{\text{выб}}$ – объем (количество) дефектных деталей со складками, $n_{\text{выб}}$ – объем выборки, δ_S – относительная разностенность; $m = d/D_0$ – коэффициент обжима. Интервалы варьирования параметров: $m = 0{,}68\ldots0{,}74$, $\delta_S = 0{,}06\ldots0{,}20$. В качестве факторов включали температуру отжига $t = 580\ldots720°C$ и относительный радиус входной части матрицы $R/S_0 = 10{,}16\ldots16{,}30$. Влияние этих факторов оказалось несущественным. В соответствии с экспериментом установлено, что при увеличении коэффициента обжима от 0,68 до 0,74 процент брака уменьшается более чем в два раза, с увеличением разностенности от 6 до 20% при $m = 0{,}68$ процент брака возрастает на $\cong 20\%$.

Появление складок характерно для участка с наименьшей толщиной стенки, где формируется (неосесимметричный) очаг интенсивной пластической деформации (ОИПД) с наибольшей интенсивностью деформации ε(рис. 10.25).

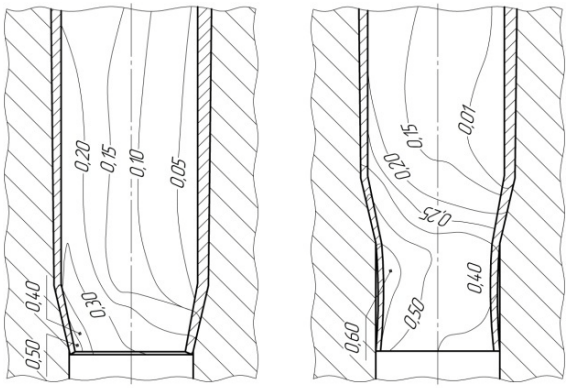
Условие локализации деформации, т.е. условие потери устойчивости пластического деформирования, представим в следующем виде:

$$e_i \geq e_{i\text{y}}, \qquad (10.49)$$

а условие устойчивости

$$e_i \leq e_{i\text{доп}} < e_{i\text{y}}, \qquad (10.50)$$

где e_i, $e_{i\text{доп}}$, $e_{i\text{y}}$ – фактическая, допустимая и предельная до потери устойчивости степени деформации соответственно. При технологических расчетах необходимо определить соотношение между величинами $e_{i\text{доп}}$ и $e_{i\text{y}}$.



а *б*

Рис. 10.25. Распределение в продольном сечении заготовки интенсивности деформации ε_i в зоне ОПД при обжиме (δ_S = 0,70): *а*, *б* – промежуточная и конечная стадия процесса

Локализация деформации и, как следствие, потеря поперечной устойчивости с образованием продольных складок (гофр), трещин в зоне ОПД при конечных пластических деформациях есть следствие неоднородности деформации заготовки по ее периметру.

При анализе этого вида потери устойчивости целесообразно выделить два случая:

1) обжим тонкостенных заготовок при выполнении условия

$$\frac{S}{a_3} \le 10; \qquad (10.51)$$

2) обжим заготовок средней и большой толщины

$$\frac{S}{a_3} > 10, \qquad (10.52)$$

где a_3 – размер зерна согласно микроструктуре металла заготовки.

За граничное значение толщины стенки $\frac{S_{\text{гр}}}{a_3} = 10$ принят размер случайной секущей, которая пересекает линии границ 10 зерен микроструктуры металла заготовки, совпадающей с параметром ориентации А.А. Ильюшина. Эту базу принято считать [1] нижней границей применимости модели сплошной среды, сформулированной на основе известного постулата А.А. Ильюшина о макроскопической определимости понятия материальной частицы, в пределах которой деформацию можно считать однородной. Предполагается, что исходная структура металла (однофазного или гетерогенного двухфазного, например, для малоуглеродистой стали) должна быть однородной и приближенно равноосной.

В первом случае неоднородность пластической деформации по периметру обжимаемой заготовки определяется, главным образом, анизотропией свойств металла на уровне микроструктуры. Можно утверждать, что в этом случае величина предельной до потери устойчивости пластической деформации $e_{i\text{y}}$ будет весьма существенно зависеть от величины зерна a_3, фазового состояния металла, вида и режимов термической обработки (температуры t и длительности выдержки τ, скорости охлаждения), вида напряженного ν_σ и деформированного ν_ε состояния заготовки. При определенной, заданной структуре металла, его величине зерна a_3 одним из основных технологических факторов является абсолютная толщина стенки S.

Во втором случае, при выполнении условия однородности деформации, более существенное влияние на неоднородность деформации по периметру будут оказывать геометрические параметры заготовки, характеризующие несовершенство ее формы, структуры и механических свойств металла в поперечном сечении: $\Delta S = S_{\max} - S_{\min}$ – абсолютная разностенность; $\delta_S = \Delta S / S_{\max}$ – относительная разностенность после обжима; $\Delta HV_\text{э} = HV_{\text{э}\max} - HV_{\text{э}\min}$ – абсолютная неоднородность механических свойств; $\delta_{HV} = \Delta HV / HV_{\text{э}\max}$ – относительная неоднородность механических свойств; $S_{\max}$, $S_{\min}$ – максимальная и минимальная толщина стенки заготовки в поперченном сечении; $HV_{\text{э}\max}$, $HV_{\text{э}\min}$ – максимальная и минимальная твердость металла в поперечном сечении заготовки.

Очевидно отрицательное влияние разностенности и в первом случае ввиду уменьшения числового значения параметра $S_{\min}/a_3$ по сравнению с его наибольшим, например номинальным, значением $\dfrac{S}{a_3} = \dfrac{S_{\max}}{a_3}$.

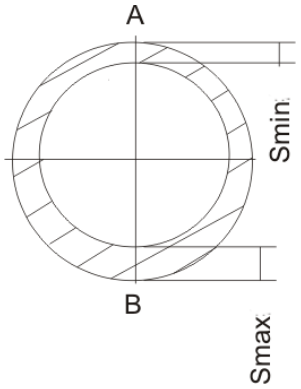


Рис. 10.26. Поперечное сечение разностенного кольцевого элемента заготовки

Рассмотрим возможность приближенной оценки допустимого значения степени деформации $e_{i\text{доп}}$ для разностенных заготовок, необходимой для технологических расчетов (10.49), (10.50). Для этого выделим в поперечном сечении заготовки в зоне очага деформации на текущей стадии процесса обжима трубной заготовки кольцевой элемент высотой dh, имеющий разностенность (ΔS, δ_S) и неоднородность механических свойств по периметру ($\Delta HV_\text{э}$, δ_{HV}). Сечения кольцевого элемента с наибольшей $S_{\max}$ и наименьшей $S_{\min}$ толщинами обозначим как условно «прочное» «В» и «слабое» «А» (рис. 10.26).

Из условия равенства погонных сил, действующих в этих сечениях, запишем:

$$T_A = \sigma_{iA} \cdot S_{\min} = T_B = \sigma_{iB} \cdot S_{\max}, \qquad (10.53)$$

где σ_{iB}, σ_{iA} – интенсивности напряжений в «прочном» «*B*» и «слабом» «*A*» сечениях.

Для аппроксимации $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ принимаем зависимость в виде степенной функции

$$\sigma_{iA} = C_A \cdot (\varepsilon_{io} + \varepsilon_{iA})^n; \ \sigma_{iB} = C_B \cdot (\varepsilon_{io} + \varepsilon_{iB})^n, \qquad (10.54)$$

где ε_{io} – величина предшествующей обжиму накопленной степени деформации (при применении перед обжимом отжига заготовки e_{io}= 0); $\varepsilon_{iA}, \varepsilon_{iB}$ – интенсивность (степень) деформации при обжиме в «слабом» и «прочном» сечениях; $\sigma_{iy}, \varepsilon_{iy}, n$ – характеристики механических свойств материала заготовки.

Разностенность в поперечном сечении деформируемой заготовки определяется по отношению толщин стенок в «прочном» *B* и «слабом» *A* сечениях, т.е.

$$\delta_{SA} = \frac{S_B - S_A}{S_A} = \frac{S_B}{S_A} - 1,$$

откуда

$$S_B = S_A(1 + \delta_{SA}). \qquad (10.55)$$

После подстановки значений σ_{iA} и σ_{iB} из уравнений (10.54) и S_B из (10.55) в равенство (10.53) и несложных преобразований получили

$$\varepsilon_{iB} = (\varepsilon_{io} + \varepsilon_{iA}) \frac{\nu^{\frac{1}{n}}}{(1 + k_S \delta_{SO})^{\frac{1}{n}}} - \varepsilon_{io}, \qquad (10.56)$$

где $\nu = \frac{C_A}{C_B}$; $k_S = \frac{\delta_{SA}}{\delta_{SO}}$ – коэффициент, учитывающий изменение разностенности заготовки в результате обжима по сравнению с ее исходным значением ($k_S \leq 1{,}0$ и устанавливается опытным путем); $\delta_{SO} = \frac{S_{OB} - S_{OA}}{S_{OA}}$ – относительная разностенность до обжима.

При критическом значении относительной разностенности исходной заготовки $\delta_{SO} = \delta_{Sкр}$ нарушается осевая симметрия деформации при обжиме (см. рис. 10.25). В последующем деформация локализуется в «слабом» сечении *A* согласно условию потери устойчивости (10.49).

Приближенное значение средней по периметру предельной степени деформации может быть определено как среднеарифметическое значение

$$e_{i\text{ïp}} = \frac{\varepsilon_{iA} + \varepsilon_{iB}}{2},$$

где $\varepsilon_{iA} = e_{iy}, \varepsilon_{iB}$ определяется из (10.56).

При введении перед обжимом отжига $\nu = 1{,}0$, $\varepsilon_{io} = 0$ и

$$e_{i\text{ïp}} = \frac{1}{2} e_{iy} \left[1 + \frac{1}{(1 + k_S \delta_{SO})^{\frac{1}{n}}} \right]. \qquad (10.57)$$

Как видно из этого равенства, с увеличением разностенности предельная, а следовательно, и допустимая $e_{i\text{доп}}$ степени деформации уменьшаются. При обжиме заготовок в матрицах с криволинейной образующей наблюдаются те же виды потери устойчивости и справедливы те же условия устойчивости.

10.5. Технологические возможности процесса обжима по обеспечению качества штампуемых деталей

Технологические возможности процесса обжима определяются областью его рационального (оптимального) применения по основным конструктивно-технологическим характеристикам изготавливаемых деталей (заготовок, полуфабрикатов), физико-механическим и технико-экономическим показателям реализуемых процессов.

Система ограничений в процессах штамповки должна гарантировать бездефектное изготовление деталей с заданными эксплуатационными и конструктивно-технологическими характеристиками и экономически целесообразную стойкость технологической оснастки. При обжиме система ограничений включает в себя рассмотренные выше основные условия потери устойчивости заготовок (10.37), (10.38), (10.42) и (10.49), которые можно выразить через конструктивно-технологические параметры штампуемых деталей, принимая во внимание известные соотношения по определению толщины стенки и степени деформации краевой части заготовки после обжима:

$$S = \frac{S_0}{\sqrt{m_\Sigma}}; \qquad (10.58)$$

$$e_{I\Sigma} = b \ln \frac{1}{m_\Sigma}; \qquad (10.59)$$

$$m_{\Sigma} = \frac{d}{D} \approx \frac{d}{D_0}, \qquad (10.60)$$

где $e_{i\Sigma}$, m_{Σ} – степень деформации и коэффициент обжима, необходимые для получения заданных размеров (*S, d, D*) штампуемой детали из исходной полой заготовки (S_0, D_0).

В результате получены соотношения, характеризующие технологические возможности процесса обжима по бездефектному изготовлению деталей:

$$\frac{S}{d} \geq \frac{k_{\text{уст}} k_{\text{н}}}{(1-0{,}5\delta_S)\sqrt{m_{\Sigma}^3}} \left(0{,}125\,\text{tg}(\alpha_2 - \alpha_1) + \frac{\left(\text{tg}\,\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right)}{6\cos(\alpha_2 - \alpha_1)} \right)^2; \qquad (10.61)$$

$$\frac{d}{D} > \exp\left(-\frac{1}{b} e_{i\text{y}}\right) - \frac{h_{\text{к}}}{D}\,\text{tg}\alpha; \qquad (10.62)$$

$$\frac{S_{\text{н}}}{D} > \frac{3}{8} \frac{\sigma_{\text{в}} e^{2\varepsilon_{i\text{y}}} \left(e^{2/\varepsilon_{i\text{y}}} - m_{\Sigma}\right)}{\varphi_{\text{кс}}} (1 - m_{\Sigma}) \times \left(1 + \sqrt{\frac{1}{m_{\Sigma}}}\right)(1 + f\text{ctg}\alpha)(3 - 2\cos\alpha), \qquad (10.63)$$

где $b = 2/\sqrt{3}$; $h_{\text{к}}$ – высота обжатой конической части детали в матрице с углом образующей α; $\varphi_{\text{кс}} = \sqrt{E_{\text{к}} E_{\text{с}}}$; $S_{\text{н}}$ – толщина стенки необжимаемой части детали (для равнотолщинной заготовки $S_{\text{н}} = S$).

После подстановки в правые части этих уравнений оптимальных значений величин, отражающих влияние технологических факторов, можно определить допустимые уровни параметров *S*/*d*, *d*/*D*, $S_{\text{н}}/D$, α для оценки технологичности конструкции деталей, изготавливаемых обжимом.

Если условия ограничения деформации (10.60)–(10.63) не могут быть удовлетворены, возникает необходимость в изменении способа обжима, т.е. в переходе от свободного обжима к обжиму с подпорами. В настоящее время разработан целый ряд способов обжима с эластично-жидкостным подпором, предотвращающих складкообразование и тем самым расширяющих технологические возможности процесса. Как показали исследования, наиболее опасна, с точки зрения устойчивости, начальная стадия обжима, которая характеризуется резким изгибом краевой части заготовки с образованием участка неприлегания длиной *l* и последующим его спрямлением под действием окружных напряжений.

На основании теоретического анализа Б.А. Кривицким условий устойчивости получено следующее уравнение для определения момента потери устойчивости при свободном обжиме:

$$\frac{R_{\text{р}}}{R}(1-\cos\alpha)+\frac{l_{\text{кр}}}{2R}\sin\alpha-\frac{l_{\text{кр}}^2}{4RR_{\text{р}}}\cos\alpha-\frac{l_{\text{кр}}^3}{2R^2R_{\text{р}}}\sin\alpha=3\frac{S}{R}, \qquad (10.64)$$

где $R=D_0/2; R_{\text{р}}$ – радиус кривизны кромки в меридиональном сечении; $l_{\text{кр}}$ – критическая длина.

Решение уравнения (10.64) относительно $l_{\text{кр}}$ показало, что для большинства случаев ($S/D < 0{,}02$; $\alpha < 30^{\circ}$) выполняется соотношение $l_{\text{кр}}/l < 0{,}8$. Этот вывод подтверждается практическими результатами.

При обжиме с подпором давлением эластично-жидкостных сред потеря устойчивости предотвращается за счет того, что спрямление краевой части происходит раньше, чем длина участка неприлегания достигнет своего критического значения. Начало спрямления зависит от давления подпора. Минимальному давлению соответствуют значения l, близкие к $l_{\text{кр}}$.

Могут быть применены две технологические схемы обжима с подпором: эластичной средой или эластичной средой с промежуточной жесткой оправкой, нагруженной давлением среды (рис. 10.27, *а*) [8]. Эти схемы различаются характером приложения нагрузки и значением требуемого давления. В схеме обжима на рис. 10.27,*б* давление на заготовку *1*, помещенную в матрицу *3*, передается через тонкостенную оправку *2*, выполненную в виде отдельных лепестков. Такая схема подпора обеспечивает создание на кромке распределенной нагрузки интенсивностью Q. При решении задачи оценки значения нагрузки Q краевая часть заготовки рассматривается в виде короткой цилиндрической оболочки высотой l с одним основанием свободным, а другим – жесткозащемленным, причем на свободном краю оболочка нагружена распределенной нагрузкой интенсивностью Q.

Условия начала спрямления:

а) возникновение в заделке момента M_0, равного моменту сопротивления пластическому изгибу:

$$M_0 = M_S = 0{,}25\sigma_i S^2; \qquad (10.65)$$

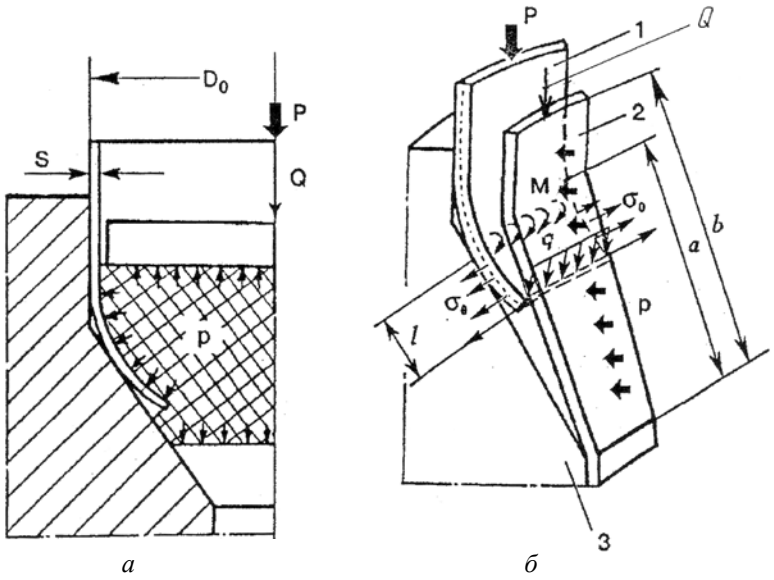
б) возникновение на свободном крае окружного растягивающего напряжения σ_θ, равного σ_i (пределу текучести материала $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{\text{т}}$):

$$\sigma_\theta = \sigma_i. \qquad (10.66)$$

Для расчета значения Q, удовлетворяющего условиям спрямления (10.65) и (10.66), использована известная методика расчета сил и моментов, возникающих в оболочке под действием нагрузки, с учетом краевого эффекта. В рассматриваемом случае уравнения совместности перемещений краев оболочки можно записать в виде

$$\Delta_{lQ}+\Delta_{0P_0}+\Delta_{0M_0}=0, \quad \nu_{lQ}+\nu_{0P_0}+\nu_{0M_0}=0, \qquad (10.67)$$

где Δ_{lQ}, ν_{lQ} – соответственно радиальное перемещение и поворот края оболочки ($x = l$) от действия нагрузки Q; $\Delta_{0P_0}, \nu_{0P_0}, \Delta_{0M_0}, \nu_{0M_0}$ – радиальные перемещения и повороты краев от действия реактивных сил P_0 и моментов M_0 в заделке.



а *б*

Рис. 10.27. Схемы обжима с подпором эластичной средой (*а*) и с промежуточной жесткой лепестковой оправкой (*б*)

Из решения этих уравнений определены значения краевых нагрузок:

$$P_0 = -0{,}83Q, \tag{10.68}$$

$$M_0 = 0{,}77\frac{Q}{k_1}, \tag{10.69}$$

где k_1 – коэффициент затухания краевого эффекта (принято $k_1 l \approx 0{,}93$).

После подстановки (10.69) в первое условие спрямления (10.65) получаем

$$Q = 0{,}32\sigma_i S^2 k_1. \tag{10.70}$$

Значение Q, удовлетворяющее условию (10.66), определяется из общего выражения для окружных напряжений:

$$\sigma_\theta = \sigma_{\theta P_0} + \sigma_{\theta M_0} + \sigma_{\theta Q}, \tag{10.71}$$

где $\sigma_{\theta P_0} = \frac{2P_0 Rk_1}{S} a_5; \sigma_{\theta M_0} = -\frac{4M_0 Rk_1}{S^2} a_6; \sigma_{\theta Q} = \frac{2QRk_1}{S} a_1$ – напряжения, возникающие на свободном крае оболочки под действием реактивных нагрузок P_0, M_0 и активной нагрузки Q; $a_1 = 2{,}2$; $a_5 = -1{,}08$; $a_6 = 1{,}77$ – значения коэффициентов, рассчитанные по методике при определении радиальных перемещений и поворотов краев оболочки с учетом принятых допущений.

Подставляя напряжения в (10.72) и принимая $\sigma_\theta = \sigma_i$, получаем

$$Q = 1{,}65\frac{\sigma_i S}{D} l = \sigma_i \sqrt{\frac{S^3}{D}}. \qquad (10.72)$$

Анализ показал, что значение Q, найденной по формуле (10.72), всегда больше, чем рассчитанное по (10.70), т.е. формула (10.72) удовлетворяет одновременно обоим условиям спрямления (10.65), (10.66) и может быть принята за основу при расчете давления подпора.

Давление подпора, необходимое для создания на кромке нагрузки интенсивностью Q, можно определить из условия равновесия одного лепестка оправки (см. рис. 10.27,*б*):

$$p = \frac{3{,}3al}{b^2}\frac{\sigma_i S}{R} \quad \text{или} \quad p = \frac{2\sigma_i a}{b^2}\sqrt{\frac{S^3}{R}}. \qquad (10.73)$$

Из (10.73) следует, что давление зависит от относительной толщины стенки заготовки S/R, предела текучести материала и геометрических параметров оправки.

Экспериментальная проверка полученной формулы путем обжима тонкостенных заготовок в штампе, оснащенном разрезной оправкой, при создании давления подпора эластично-жидкостной средой показала удовлетворительную сходимость расчетных и опытных значений p (в пределах 10…15%).

Для расчета давления подпора эластичной среды без оправки (см. рис. 10.27,*а*) можно рекомендовать следующую формулу, полученную аналогичным образом:

$$p = 6{,}2C\sigma_i \frac{S}{R}, \qquad (10.74)$$

где C – эмпирический коэффициент, зависящий от твердости среды. При твердости среды по Шору 70…80 единиц C = 0,1…0,16, при твердости ≈ 50 единиц $C \approx 0{,}5$. Применение среды твердостью ниже 40 единиц нецелесообразно ввиду ее затекания под кромку заготовки в момент образования участка неприлегания и отсутствия эффекта более раннего спрямления.

Выше отмечалось, что причиной потери устойчивости и образования гофр на текущей контактной деформации (4-я стадия) является локализация деформации. Поэтому, очевидно, методы их предотвращения должны основываться на необходимости устранения локализации деформации. Следует отметить, что интенсивность локальной деформации, которая предшествует образованию складки или разрушению, даже в случае сильно упрочненного материала весьма значительна, что свидетельствует о том, что ресурс пластичности далеко не исчерпан.

Принципиальная основа метода предотвращения складкообразования состоит в повышении сопротивляемости пластической деформации в месте ее наиболее интенсивного протекания за счет увеличения гидростатического давления при приложении контактного нормального напряжения со стороны внутренней поверхности (рис. 10.28). Тогда, в соответствии с известным энергетическим условием Губера–Мизеса, для поддержания пластического состояния в этой зоне потребуется несколько большее (по модулю) главное сжимающее напряжение

$$\sigma_{\theta н} = k_\sigma \sigma_\theta, \qquad (10.75)$$

где $\sigma_{\theta н}, \sigma_\theta$ – окружные сжимающие напряжения в зоне и вне зоны приложения давления подпора.

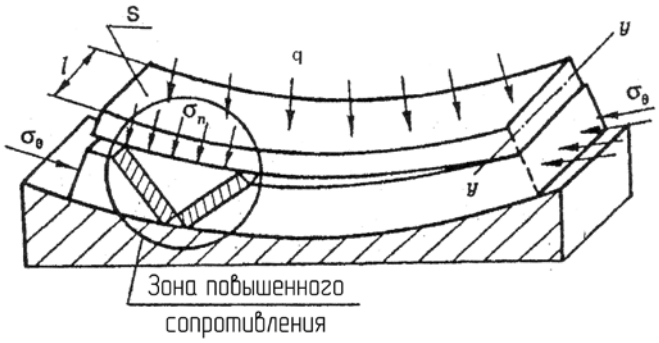


Рис. 10.28. Схема предотвращения складкообразования на стадии контактной деформации

Полагаем, что различие в сопротивляемости отдельных участков заготовки к моменту локализации деформации определяется неоднородностью деформационного упрочнения металла по сечению и не превышает 10…15%. На этом основании принимаем в (10.75) коэффициент k_σ =1,10…1,15.

Значение нормального напряжения σ_n можно определить из уравнения равновесия сил, действующих в зоне локализации, спроецированных на направление нормали к срединной поверхности заготовки, с учетом (10.75):

$$\sigma_n = 4\frac{k_\sigma \sigma_\theta S}{\left[(D+d)-S\right]}\cos\alpha, \qquad (10.76)$$

где $\sigma_\theta = b\sigma_i$. При таком давлении подпора пластическая деформация переключается на соседние участки заготовки, где сопротивляемость пластической деформации ниже.

Практически реализовать подобный принцип можно, если на внутреннюю поверхность заготовки передавать давление какой-либо среды (жидкости,

газа) через промежуточную жесткую пластину (см. рис. 10.28). Сдвиговый характер локальной деформации обусловливает смещение зоны интенсивной деформации к центру кривизны заготовки и тем самым способствует созданию давления при ее контакте с подпором. Этот процесс происходит непрерывно. Таким образом, пластина, нагруженная давлением, выполняет роль своеобразного регулятора интенсивности пластической деформации, затормаживая ее развитие каждый раз в месте начала ее наиболее интенсивного протекания. Следует отметить, что в случае непосредственного, равномерно распределенного давления среды подобный эффект получить не удается, так как условие пластичности изменяется во всех сечениях по периметру одновременно. Значение давления, обеспечивающего создание напряжения σ_n в зоне локализации, приближенно можно определить из условия равновесия жесткой пластинки, передающей давление:

$$q = \frac{2DS(1-m)}{F_{\text{п}} \cos\alpha}\sigma_n, \qquad (10.77)$$

где $F_{\text{п}}$ – площадь поверхности пластины.

С учетом изложенного задача оценки технологических возможностей распадается на два этапа.

На первом этапе устанавливаются варианты технологии по принятой системе общей классификации процессов обжима. При этом учитывается сложившаяся структура комплексных технологических процессов изготовления деталей типа тел вращения с применением продольного обжима (рис. 10.29).

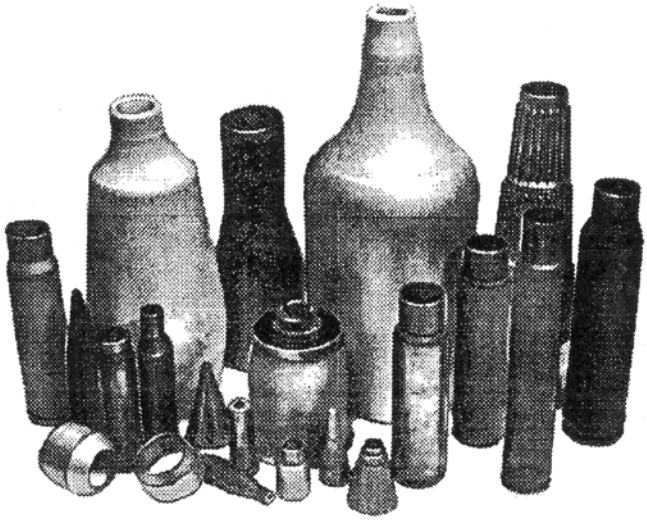


Рис. 10.29. Детали различного назначения, изготавливаемые с применением способов продольного обжима

По виду исходных заготовок различают технологические процессы изготовления деталей из трубных заготовок (без дна) и полых с дном, получаемых способами вытяжки и выдавливания. И в том и в другом случае заготовки могут быть упрочнены в результате наклепа, величина которого может быть переменной по высоте детали. В связи с этим, как правило, перед обжимом в технологическом процессе предусматривается термообработка, полностью или частично снимающая наклеп и восстанавливающая штампуемость материала. При этом отжигу подвергается только обжимаемая часть заготовки. Операциям термообработки сопутствует химическая обработка, предназначенная для удаления окалины, очистки поверхностей, а также нанесения технологических покрытий (фосфатирование, пассивирование, анодирование и т.д.) и смазок. В пределах технологического маршрута могут быть выделены технологические циклы, влияющие на штампуемость материала и свойства готовой детали. Обжим может выполняться за одну или несколько операций с введением промежуточной термообработки или без нее.

На втором этапе решения реализуется, например по e_{iy}, полный факторный эксперимент, с уравнением регрессии типа (10.47), по которому устанавливаются интенсивность и направление влияния факторов управления (степень предварительной деформации e_{i0}, температура промежуточного отжига t, толщина заготовки S_0, отношение главных напряжений $\sigma_\rho / \sigma_\theta$) на параметры, заложенные в систему ограничений. Последующим «крутым восхождением» может быть определена область допустимых значений.

10.6. Контроль качества деталей при обжиме

Контроль полуфабрикатов после обжима осуществляется по внешнему виду и размерам.

Виды брака, выявляемые при внешнем осмотре, можно разделить на три группы в зависимости от причин его возникновения:

1) вследствие потери устойчивости заготовки (местные и равномерно распределенные продольные складки, трещины в зоне дульца, ската, иногда корпуса, поперечные складки в зоне корпуса);

2) вследствие загрязнения смазки, низкой культуры производства (царапины, вмятины, забоины и др.), выхода из строя инструмента (табл. 10.4);

3) вследствие заклинивания дульца гильз (обрывы дульца).

Размеры, контролируемые при обжиме, допуски на размеры и тип применяемого контрольно-измерительного инструмента приведены в табл. 10.5. Размеры капсюльного гнезда и наковальни контролируются для 7,62-мм гильз к патрону образца 1943 г. и пистолетному патрону. Косина фланца контролируется при обжиме 14,5-мм гильз на первых обжимах. Наружный диа-

метр у обреза контролируется только у крупнокалиберных гильз. Основные виды брака, выявляемые при лекальном контроле, приведены в табл. 10.6.

Таблица 10.4

Виды и причины брака при обжиме

Вид	Причина
Складки вдоль образующей по всему периметру	Малая относительная толщина заготовки, низкий коэффициент обжима
Складки односторонние вдоль образующей, в зоне дульца и ската	Разностенность, неравномерный отжиг по периметру, местные забоины в полуфабрикате
Складки поперечные в месте перехода от корпуса к скату	Резкое изменение механических свойств верхней части корпуса после отжига
Трещины, сдвиги металла в зоне дульца	Недостаточный отжиг дульцевой части гильзы, попадание на обжим гильзы, имеющей толстые стенки, большой наружный диаметр заготовки, малый рабочий диаметр обжимной матрицы, низкий коэффициент обжима
Складки (вмятины) по скату с переходом их на корпус	Засорение «воздушных» отверстий в матрице
Царапины	Царапины на полуфабрикате, загрязнение смазки, отслаивание хромового покрытия, выкрашивание и трещины на матрице
Вмятины	Забоины, вмятины на полуфабрикате
Отпечаток по скату	Загрязнение матрицы вследствие налипания окалины после отжига
Отпечатки по дульцу	Налипание металла на обжимном стержне, нечисто обрезанный полуфабрикат вытяжки, в результате чего оставшийся зауселец завертывается во внутреннюю поверхность
Засечка на гильзе	Толстая стенка или больший, чем требуется, диаметр заготовки, поступающей с вытяжки. Острый край у одной из обжимных матриц
Разорванный край у дульца	Попадание на обжим заготовок, имеющих повышенную разностенность
Подсаженный скат	Отрыв дульца в процессе обжима. Оторванная дульцевая часть, оставаясь в обжимной матрице, вызывает подсадку в поданных для обжима гильзах
Уменьшенный внутренний и наружный диаметр дульца	Толстая заготовка. Неправельные размеры обжимного стержня
«Узкое» капсюльное гнездо	«Строгая» матрица

Таблица 10.5

Контролируемые размеры заготовки и точность их выполнения при обжиме

Контролируемый размер	Допуск на размер	Класс точности	Контрольно-измерительный инструмент
Наружный диаметр дульца у начала ската	0,020-0,140	4	Кольцо со стойкой на диаметр дульца
Наружный диаметр дульца у обреза	0,030-0,150	4	Кольцо на диаметр
Внутренний диаметр дульца	0,040-0,060	3	Калибр на внутренний диаметр дульца
Диаметр корпуса под фланцем	0,002-0,040	3	Кольцо на диаметр корпуса
Диаметр корпуса и ската	0,050-0,060	3	Кольцо на диаметр каморы
Длина корпуса гильзы	0,200-0,300	4-5	Кольцо со стойкой на диаметр дульца, коробочка
Угол конусности корпуса и ската	--	--	Камора
Косина фланца	$\leq$ 0,200	--	Прибор для контроля косины
Диаметр капсюльного гнезда	0,030-0,035	3	Калибр на диаметр
Глубина капсюльного гнезда	0,080-0,1000	4	Шаблон на глубину
Высота наковальни	0,100	5	Шаблон

Таблица 10.6

Виды и причины лекального брака при обжиме

Вид	Причина
Увеличенные внутренний и наружный диаметры дульца («широкое» дульце)	Тонкостенный полуфабрикат. Неправильные размеры обжимного стержня или втулки. Износ дульцевой части матрицы
Уменьшенные внутренний и наружный диаметры дульца («узкое» дульце)	Толстостенный полуфабрикат. Неправильные размеры обжимного стержня или втулки. Неправильный размер матрицы по дульцу при обжиме без стержня
«Узкое» капсюльное гнездо и наплыв в нижней части корпуса	Строгая матрица по корпусу при поступающем на обжим полуфабрикате, изготовленном к верхнему допустимому пределу
Брак по каморе	Неточно изготовленная или изношенная матрица

10.7. Технологические расчеты

10.7.1. Исходные данные и последовательность расчетов

Исходные данные для расчета параметров технологического процесса обжима:

- чертеж готовой детали;
- технические требования по механическим свойствам материала готовой детали;
- маршрутный технологический процесс изготовления детали;
- предельные и допустимые значения степеней деформации, заданные табличным методом и (или) в виде математических моделей.

Последовательность расчета:

- определение размеров и механических свойств конечной штампованной заготовки;
- оценка и, при необходимости, обеспечение ТКИ конечной штампованной заготовки и готовой детали;
- расчет размеров исходной для обжима заготовки;
- расчет количества операций обжима;
- расчет размеров заготовок после промежуточных обжимов;
- расчет исполнительных размеров рабочего инструмента;
- расчет технологических усилий.

Формирование технологического маршрута процесса обжима заключается в уточнении состава основных и подготовительных операций по заданному в исходных данных полному технологическому маршруту изготовления гильзы.

К основным операциям следует отнести операции формоизменяющие (обжим, обрезка), а также термические, обеспечивающие совместно с обжимом формирование требуемого уровня механических свойств конечной штампованной заготовки и готовой детали.

К подготовительным операциям, сопутствующим основным, относятся химическое травление, промывка, охлаждение, сушка, омыление и некоторые другие.

Выбранный технологический маршрут корректируется после уточненного расчета количества операций обжима и исключения (или добавления) из технологического маршрута «лишних» операций обжима и сопутствующих им подготовительных операций.

10.7.2. Расчет размеров и механических свойств конечной штампованной заготовки

При определении размеров заготовки назначают следующие расчетные сечения (рис. 10.30): верхнее (в.р.с.), соответствующее торцевому срезу готовой гильзы; среднее (с.р.с.), соответствующее переходу ската в корпус, и нижнее (н.р.с.), соответствующее сопряжению внутренних поверхностей стенки и дна.

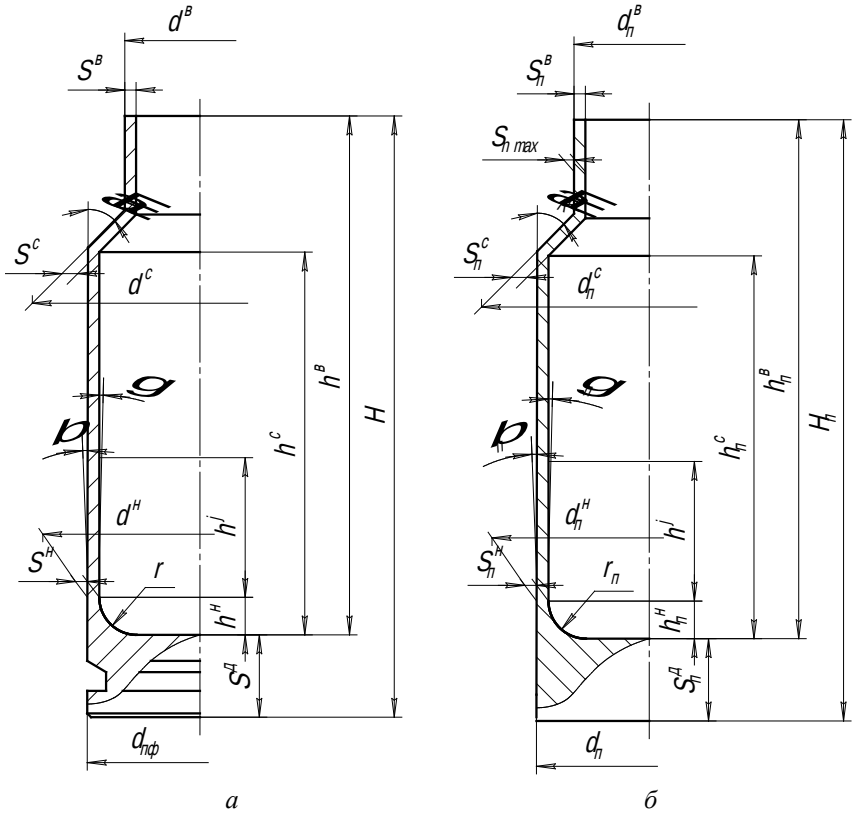


Рис. 10.30. Эскиз готового изделия (*а*) и конечной заготовки после последнего обжима (*б*)

В зависимости от конфигурации детали, количества и положения контролируемых по механическим свойствам (твердости) поясов детали число расчетных сечений может и увеличиться. При отсутствии в технологическом маршруте последующей (после последнего обжима) механической обработки и штамповки все размеры конечной штампованной заготовки (после последнего обжима), за исключением длины дульца, общей высоты, размеров канавки (экстракторной) и фланца, принимаются равными соответствующим размерам готовой детали (рис. 10.30):

$$
\begin{aligned}
&d_n^{\text{â}} = d^{\text{â}};\ \ S_n^{\text{â}} = S^{\text{â}} C_S^{\text{â}};\ \ h_n^{\text{â}} = h^{\text{â}};\\
&d_n^{\tilde{\text{n}}} = d^{\tilde{\text{n}}};\ \ S_n^{\tilde{\text{n}}} = S^{\tilde{\text{n}}};\ \ h_n^{\tilde{\text{n}}} = h^{\tilde{\text{n}}};\\
&d_n^{\text{í}} = d^{\text{í}};\ \ S_n^{\text{í}} = S^{\text{í}};\ \ h_n^{\text{í}} = h^{\text{í}};\\
&H_n = H + \Delta H;\ \ h_{\text{ä}n} = h_{\text{ä}} + \Delta H;\\
&\beta_n = \beta;\ \alpha_n = \alpha;\ r_n = r;\ \gamma_n = \gamma,
\end{aligned}
\qquad (10.78)
$$

где $C_S^{\text{в}}$ – коэффициент, учитывающий изменение толщины стенки обжатой в матрице заготовки за счет возможной калибровки обжимным стержнем; ΔH – припуск на подрезку дульца.

Если обжим выполняется в матрице с установленным неподвижно обжимным стержнем, то коэффициент $C_S^{\text{в}} = 1$. Если калибровка выполняется после завершения обжима, например путем протягивания обжимного стержня через дульце, то следует принять

$$C_S^{\text{в}} = 1{,}1. \tag{10.79}$$

Припуск на подрезку дульца принимается

$$\Delta H = 1{,}0\ldots1{,}5 \text{ мм}. \tag{10.80}$$

Меньшее значение – для малых калибров: 5,45; 5,56 мм.

Толщина дна и размеры капсюльного гнезда формируются на предшествующих операциях по штамповке дна. При обжиме дно не подвергается пластической деформации, поэтому размеры капсюльного гнезда в дне конечной штампованной заготовки будут равны соответствующим размерам готовой детали (рис. 10.31,*а*):

$$\begin{aligned} &S_n^{\text{д}} = S^{\text{д}};\ \ S_n^{\text{п}} = S^{\text{п}};\ \ d_{\text{кгп}} = d_{\text{кг}};\\ &h_{\text{кгп}} = h_{\text{кг}};\ \ h_{\text{нп}} = h_{\text{н}};\ \ h'_{\text{нп}} = h'_{\text{н}};\\ &d_{\text{нп}} = d_{\text{н}};\ r_{1n} = r_1;\ r_{2n} = r_2;\\ &r_{3n} = r_3;\ r_n = r;\ R_n = R. \end{aligned} \tag{10.81}$$

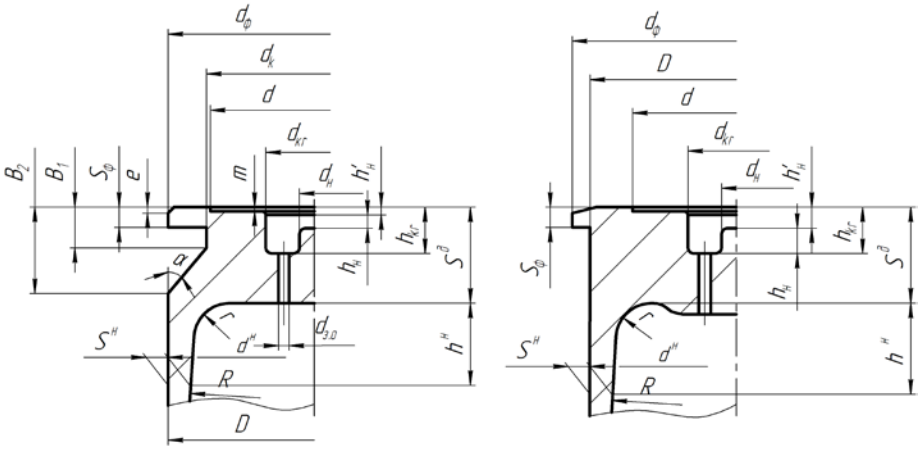


Рис. 10.31. Эскизы дна штампованных заготовок для гильз с невыступающим (*а*) и выступающим (*б*) фланцами

Возможны три варианта сопряжения стенки с дном детали: одним радиусом (рис. 10.32,*а*), двумя радиусами (рис. 10.32,*б*) и тремя (рис. 10.32,*в*). Для детали со штампуемым фланцем (типа винтовочных гильз) (рис. 10.31,*б*)

$$d_{\text{ф}n} = d_{\text{ф}}. \qquad (10.82)$$

Механические свойства конечной штампованной заготовки определяются в зависимости от механических свойств готовой детали, заданных согласно техническим требованиям в определенных контрольных сечениях, и принятого вида технологического маршрута обработки заготовки. Преимущественно в технологических расчетах используют характеристики твердости *HV*, а также прочности: $\sigma_{\text{т}}(\sigma_{0,2})$, $\sigma_{\text{в}}$ и σ_i. Если в чертеже на деталь отсутствуют требования по механическим свойствам, то отпадает необходимость в их определении для конечной штампованной заготовки. Вид заданного технологического маршрута определяет схемы и модели формирования механических свойств конечной обжатой заготовки в каждом из расчетных сечений.

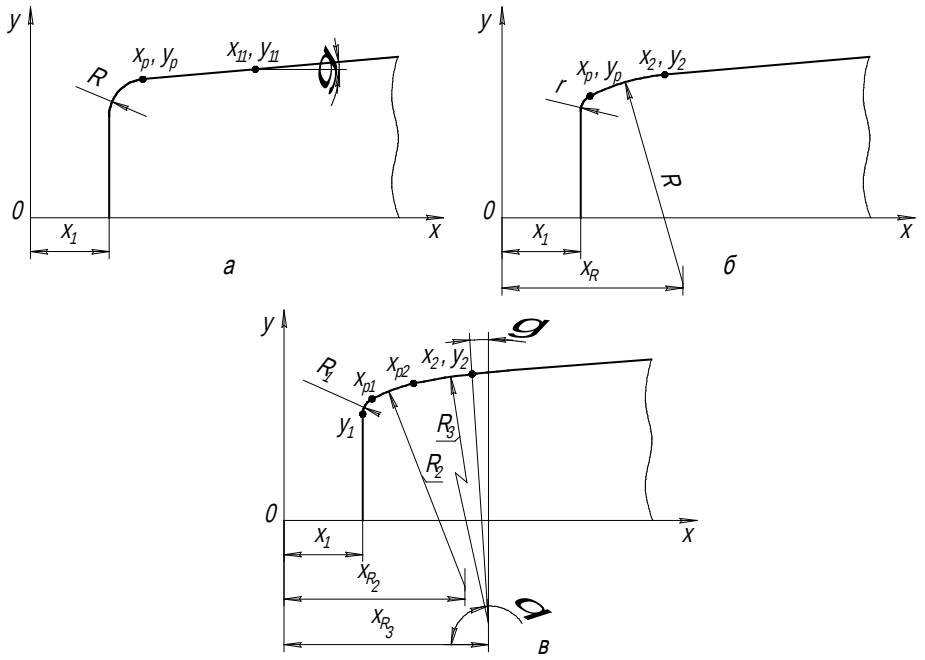


Рис. 10.32. К расчету координат узловых точек сопряжения стенки и дна детали: *а*, *б*, *в* – сопряжение одним, двумя и тремя радиусами

На рис. 10.33 показаны схемы формирования механических свойств в различных расчетных сечениях конечной штампованной заготовки на этапе технологического процесса обжима.

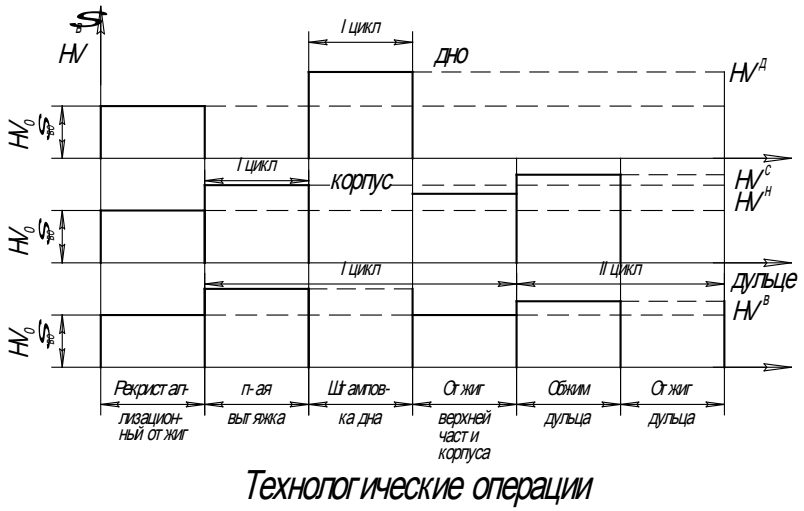


Рис. 10.33. Схемы формирования механических свойств в различных расчетных сечениях гильзы на этапе технологического процесса обжима

Каждая схема показывает дискретный характер изменения уровня механических свойств обрабатываемой заготовки. При этом процесс обжима влияет на формирование механических свойств дульца, ската и частично верхней части корпуса гильзы и практически не влияет на свойства нижней его части, т.е. в нижнем расчетном сечении. Эта схема соответствует обжиму с предварительным отжигом (рекристаллизационным) краевой части заготовки, обжиму за одну или несколько операций без промежуточных и без завершающего отжига дульца. Однако при изготовлении изделий различного назначения возможны несколько вариантов технологического маршрута и соответственно схем формирования механических свойств (рис. 10.34):

1) с применением предварительной (до обжима), промежуточной (между операциями обжима) и завершающей (после последнего обжима) разупрочняющей термической обработки;

2) то же, что по варианту 1, но без промежуточной разупрочняющей термической обработки;

3) то же, что по варианту 2, но без завершающей термической обработки;

4) то же, что по варианту 3, но без предварительной термообработки.

К разупрочняющей термической обработке относят полный и неполный рекристаллизационный отжиг, а также отжиг дорекристаллизационный, предназначенный для снятия остаточных напряжений. Для построения математических моделей формирования механических свойств обрабатываемой заготовки введем понятие о цикле обработки в технологическом маршруте (простой, сложный, завершенный, незавершенный).

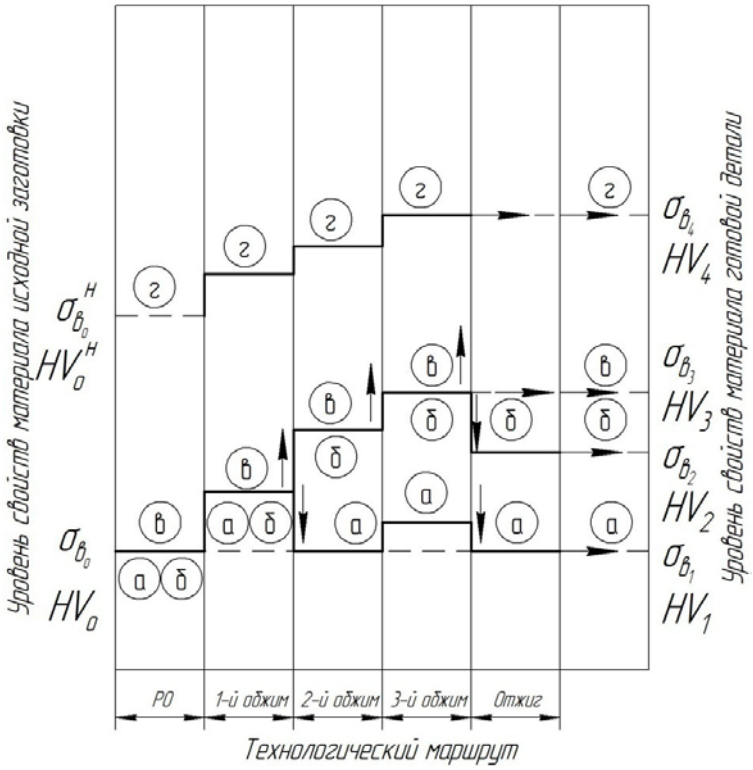


Рис. 10.34. Схема формирования прочностной характеристики механических свойств детали при реализации разупрочняющих циклов обработки

Под простым завершенным циклом обработки понимается сочетание двух последовательно выполняемых по технологическому маршруту операций: первой штамповочной (обжим, вытяжка и др.), второй термической обработки (как правило, отжиг). Тогда простой незавершенный цикл обработки соответствует одной штамповочной операции без последующей термической.

На штамповочной операции происходит изменение структуры и механических свойств материала заготовки по сравнению с исходным уровнем в результате деформационного упрочнения при пластической деформации.

При проведении любой последующей термической операции за счет нагрева происходит полное или частичное разупрочнение наклепанного металла, т.е. восстановление (полное или частичное) его структуры и механических свойств. Сложный цикл может быть сформирован как сочетание завершенных и незавершенных циклов обработки.

Для перечисленных четырех схем формирования механических свойств применяются следующие виды математических моделей.

1. Модель многоцикловой разупрочняющей обработки предполагает, что механические свойства материала исходной заготовки соответствуют отожженному состоянию, а механические свойства деформированных на первом и втором, *n*-м циклах обработки заготовках могут отличаться от исходных на какую-то величину ввиду отличия режимов промежуточной и завершающей термообработки от режимов полного рекристаллизационного отжига. На рис. 10.35 приведен вариант графической модели формирования прочностных свойств детали (конечной штампованной детали) в пределах двух ($W = 2$) завершенных циклов: первого и второго обжимов.

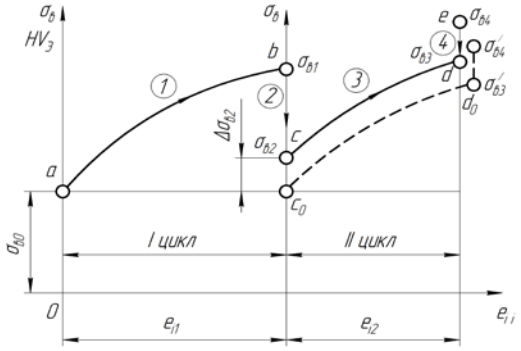


Рис. 10.35. Схема одноцикловой разупрочняющей обработки

В качестве прочностной характеристики может рассматриваться любая из них: $\sigma_т(\sigma_{0,2})$, $\sigma_в$, *HV*, σ_{iy} и др. На рисунке пунктирной линией показан участок единой кривой упрочнения металла в отожженном состоянии c_0d_0, соответствующий цикловой степени деформации e_{i2} (принимается допущение, что кривая упрочнения *cd* эквидистантна участку кривой c_0d_0). Отрезки *bc* и *de* показывают эффекты разупрочняющей термообработки.

В соответствии с этой схемой модель сложного цикла, состоящего из двух простых завершенных циклов, имеет вид

$$M^j = M_e^j = M_{e0}^j\left(e_{i2}^j, t_2^j, \tau_2^j\right) + M_{ct}^j\left(e_{i1}^j, t_1^j, \tau_1^j\right) - M_0, \qquad (10.83)$$

где $M_{e0}^j\left(e_{i2}^j, t_2^j, \tau_2^j\right)$ – многофакторная модель цикла 2; $M_{ct}^j\left(e_{i1}^j, t_1^j, \tau_1^j\right)$ – многофакторная модель цикла 1; e_{i1}^j, e_{i2}^j – степени деформации на 1-м и 2-м циклах; t_1, τ_1, t_2, τ_2 – температура и длительность выдержки при нагреве (режим) на первом и втором отжигах.

По аналогии можно записать для любого числа циклов:

$$M^j = \sum_{S=1}^{W} M_{S0t}^j\left(e_{iS}^j, t_S^j, \tau_S^j\right) - (W-1)M_0, \qquad (10.84)$$

где $M_{S0t}^j\left(e_{iS}^j, t_S^j, \tau_S^j\right)$ – многофакторная модель цикла *S*; *S* – номер цикла (S =1; *W*); M_{S0t}^j – выходная переменная (отклик) многофакторной модели;

$e_{iS}^{j}, t_{S}^{j}, \tau_{S}^{j}$ – степень деформации, температура и время выдержки заготовки на цикле «*S*» в сечении *j*.

Если принимается, что на первом или любом промежуточном цикле режим термообработки (t_1, τ_1) соответствует полному рекристаллизационному отжигу, то вместо моделей сложного цикла (10.83) и (10.84) применяется простая одноцикловая (рис. 10.35):

$$M^{j} = M_{2t}^{j}\left(e_{i2}^{j}, t_{2}^{j}, \tau_{2}^{j}\right) \qquad M^{j} = M_{Wt}^{j}\left(e_{iW}^{j}, t_{W}^{j}, \tau_{W}^{j}\right) \tag{10.85}$$

где *W* – номер последнего цикла в технологическом маршруте.

2. Модель многоцикловой обработки без промежуточных отжигов в отличие от модели 1 рассматривает формирование механических свойств конечной заготовки и готовой детали как результат одного полного завершенного цикла, в котором процесс штамповки–обжима выполняется за одну операцию, но со степенью деформации, равной сумме степеней деформации на всех операциях, т.е. принимается, что степень деформации на последнем цикле будет равна:

$$e_{iW_{\Sigma}}^{j} = \sum_{S=1}^{W} e_{iS}^{j}, \tag{10.86}$$

где *S* – номер текущего цикла. Тогда по аналогии с (10.85) можно записать:

$$M^{j} = M_{Wt}^{j}\left(e_{iW_{\Sigma}}^{j}, t_{W}^{j}, \tau_{W}^{j}\right). \tag{10.87}$$

Модели циклов будут те же, что и в первом случае.

3. Модель многоцикловой обработки без промежуточных и завершающего отжигов учитывает формирование механических свойств конечной заготовки и готовой детали от исходного уровня за несколько незавершенных циклов (штамповочных операций–обжимов) только за счет деформационного упрочнения (наклепа). Так же как и в модели 2, принимаем во внимание согласно (10.86) суммарную степень деформации $e_{iW_{\Sigma}}^{j}$ и представляем модель многоцикловой обработки в виде незавершенной одноцикловой:

$$M^{j} = M_{Wei}^{j}\left(e_{iW_{\Sigma}}^{j}\right). \tag{10.88}$$

Модель типа (10.88) простая однофакторная в отличие от всех предыдущих многофакторных моделей. Модели (10.86), (10.88) предполагают допущение об отсутствии влияния дробности деформации на характер кривых упрочнения «M–e_i». Модели (10.84)–(10.85), (10.88) относятся к характеристикам как прочности, так и пластичности.

4. Модель многоцикловой упрочняющей обработки описывает формирование механических свойств конечной заготовки и готовой детали за счет деформационного упрочнения металла как на операциях обжима, так и на предшествующих ему штамповочных операциях, но другого вида, например на вытяжке.

В отличие от моделей (10.86) и (10.88) следует записать:

$$e^j_{iW_\Sigma} = e^j_{i0} + \sum e^j_{iS} \tag{10.89}$$

и

$$M^{\,j} = M^j_{Wei}\left(e^j_{i0} + \sum e^j_{iS}\right) \tag{10.90}$$

– однофакторная модель, где e^j_{i0} – степень предварительной деформации на штамповочных операциях другого вида.

На рис. 10.36 приведена общая блок-схема алгоритма расчета размеров и механических свойств конечной штампованной заготовки, получаемой обжимом. Предусмотрен вариант применения частичной механической обработки резанием (растачивания, обтачивания). В соответствии с этим алгоритмом выбираются схемы для расчета формирования механических свойств и вида расчетной модели.

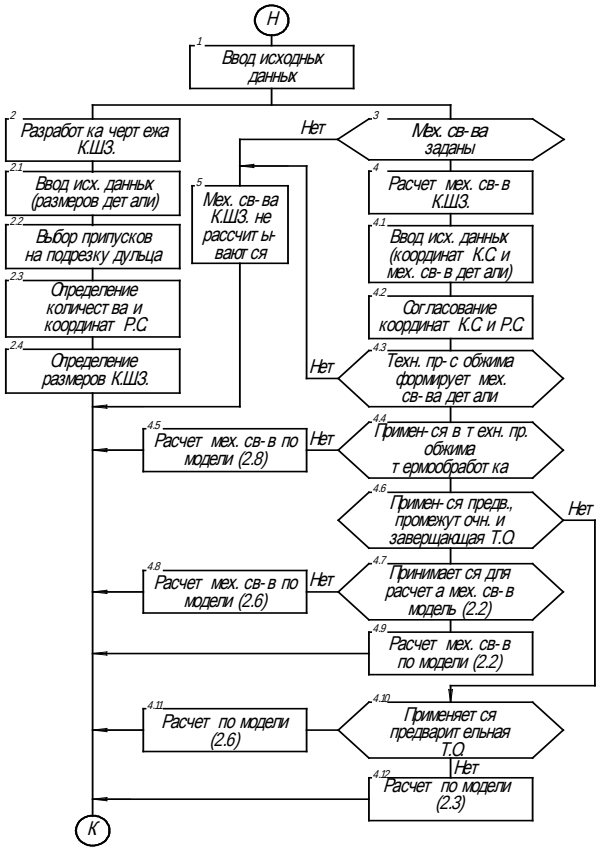


Рис. 10.36. Блок-схема алгоритма расчета размеров и механических свойств конечной заготовки

Пример алгоритма определения механических свойств.

1. Определить вид и значения заданной характеристики механических свойств M ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_в$, HV) материала готовой детали в расчетных сечениях $j = 1, 2, \ldots, k$.

2. Определить технологические маршруты процесса обжима и технологические схемы формирования механических свойств в каждом расчетном сечении обжимаемой части заготовки.

3. Выбрать однофакторные или многофакторные модели циклов для заданной марки материала и характеристики механических свойств ($\sigma_в$, $\sigma_в/\sigma_{в0}$, HV, HV/HV_0, δ) для расчетных сечений.

4. Выбрать по справочным данным режим отжига на последнем цикле (t_n, τ_n) или на всех циклах.

5. Рассчитать по принятой модели характеристики механических свойств в зависимости от степени деформации на цикле (циклах) и режимов отжига, т.е. $M_п^f = f\left(e_{in}^j, t_п^j, \tau_п^j\right)$, где $j = 1, 2, \ldots, k$.

6. Если в модели фактор степени деформации выражен условным показателем ψ, то заменить его значением e_i (логарифмическим показателем) из выражения

$$e_{in}^j = -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln\left(1 - \frac{\psi_n^j}{100}\right), \tag{10.91}$$

если $\psi_п^j$ задано в модели в процентах, или

$$e_{in}^j = -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln\left(1 - \psi_n^j\right),$$

если $\psi_п^j$ задано в модели в относительных величинах.

По аналогичной схеме выполняются расчеты и по другим моделям.

Для технологической схемы без применения завершающей (после обжима) термообработки механические свойства не рассчитываются, а принимаются равными свойствам готовой детали в соответствующих расчетных сечениях, т.е.

$$M_n^j = M^j; (j = 1, 2, \ldots, k). \tag{10.92}$$

10.7.3. Оценка и обеспечение технологичности конструкции конечной штампованной заготовки

Под технологичностью конструкции изделия (ТКИ) применительно к процессу обжима понимают степень ее пригодности к изготовлению за наименьшее число операций при обеспечении устойчивости и прочности заготовки и заданного уровня качества штампуемой детали. Основные технические показатели ТКИ для процесса обжима:

- штампуемость материала заготовки, поступающей на обжим, для соответствующего расчетного сечения;
- степень геометрической сложности штампуемой детали;
- степень сложности механических свойств.

Штампуемость материала и степень сложности конструкции детали, изготавливаемой обжимом, ограничиваются в основном возможностью потери устойчивости различного вида.

На основании анализа условий устойчивости заготовки при обжиме выделены следующие показатели ТКИ по трем группам.

1. Штампуемость материала: характеристики сопротивления деформированию ($\sigma_{0,2}(\sigma_т)$, $\sigma_в$); характеристики пригодности к деформационному упрочнению ($\sigma_{0,2}/\sigma_в$, n); характеристики предельной устойчивой деформации (ε_{iy}, e_{iy}), характеристики упругопластических свойств (E, $E_к$, $E_с$);

2. Степень сложности геометрической формы: форма детали в целом; количество конструктивных элементов $N_э$ детали, в том числе унифицированных, стандартизованных и повторного применения ($N_у$, $N_{ст}$, $N_{пт}$); безразмерные геометрические параметры: (H/D, d_{min}/D, S_{min}/D), допускаемые отклонения на размеры, требования по шероховатости поверхностей, габаритные размеры (H, D, S);

3. Степень сложности физико-механических свойств: степень упрочнения материала готовой детали по отношению к исходному (отожженному) состоянию ($HV^j \big/ HV_0^j$, $\sigma_{\hat{в}}{}^j \big/ \sigma_{\hat{в}0}^j$); степень неравномерности распределения механических свойств по длине обжимаемой заготовки ($\sigma_{\hat{в}}^{\hat{в}} \big/ \sigma_{\hat{в}}^{\tilde{n}}$, $\sigma_{\hat{в}}^{\tilde{n}} \big/ \sigma_{\hat{в}}^{\acute{i}}$); степень неравномерности структуры металла.

Уровень ТКИ оценивается в соответствии с положениями, изложенными в разд.1 по соотношению единичных показателей разрабатываемой конструкции $П_{Tj}$ и их базовых значений $П_{T\delta j}$, например в виде разностной целевой функции

$$\Delta K_j = П_{Tj} - П_{Tj\delta} \qquad (10.93а)$$

или

$$\Delta K_j = 1 - K_{Tj}, \qquad (10.93б)$$

где $K_{Tj} = П_{Tj} \big/ П_{Tj\delta}$, j – номер частного (в группе) показателя.

За базовые значения показателей могут быть приняты контрольные уровни, устанавливаемые на основе анализа условий устойчивости, экспериментальных данных и производственной практики.

С учетом (10.93) целевая функция обеспечения ТКИ

$$z_j : \Delta K_j \to \min. \qquad (10.94)$$

Значения контрольных уровней отдельных (частных) показателей ТКИ по группам для трех оценок (высокой, средней и низкой) технологичности приведены в табл. 10.7.

Таблица 10.7

Контрольные уровни показателей ТКИ заготовок и деталей, изготавливаемых обжимом

Группа показателей ТКИ	Вид показателя ТКИ		Уровень технологичности		
			высокий	средний	низкий
1. Штампуемость материала заготовки	1.1. Сопротивление материала деформированию $\sigma_{0,2}(\sigma_т)$, МПа		Менее 260	260…520	Более 520
	1.2. Пригодность материала к деформационному упрочнению	$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_в}$	Менее 0,60	0,60…0,75	Более 0,75
		n	Более 0,25	0,25…0,15	Менее 0,15
	1.3. Предельная до потери устойчивости деформация	ε_{ky}	Более 0,25	0,25…0,15	Менее 0,15
		e_{ky}	Более 0,40	0,40…0,25	Менее 0,25
2. Степень сложности геометрической формы	2.1. Общая форма детали		Осесимметричная одноступенчатая	Осесимметричная многоступенчатая	Неосесимметричная
	2.2. Общее количество формируемых на обжиме конструктивных элементов $N_э$		Не более 1	1…3	Более 3
	2.3. Относительная высота H/D		Менее 1,0	1,0…5,0	Более 5,0
	2.4. Относительная толщина стенки обжатой части детали $\frac{S}{d}100$		Более 2,7	2,7…0,9	Менее 0,9
	2.5. Перепад диаметров d/D		Более 0,80	0,80…0,65	Менее 0,65
	2.6. Односторонний угол конусности α, град		Менее 15	15…25	Более 25
	2.7. Относительный радиус сопряжения корпуса и ската $R_{ск}/D$		Более 0,3	0,3…0,1	Менее 0,1
	2.8. Относительный радиус сопряжения ската и дульца $R_д/d$		Более 0,3	0,3…0,1	Менее 0,1
	2.9. Допускаемые отклонения на диаметры, квалитет		Более 12	11-12	Менее 11
	2.3. Допускаемые отклонения на поперечную разнотолщинность $\delta_{пр}$, %		Более 25	25…10	Менее 10
	2.11. Габаритные размеры		Менее 50	50…200	Более 200
3. Степень сложности физико-механических свойств	Степень упрочнения материала обжимаемой части детали $HV/HV_0\,(\sigma_в/\sigma_{в0})$		Менее 1,3	1,3…1,5	Более 1,5

При необходимости по отдельным группам показателей и в целом для характеристики ТКИ могут быть определены так называемые комплексные показатели $П_{T\Sigma}$:

$$П_{T\Sigma} = \sum_{j=1}^{B} П_{Tj} q_j, \qquad (10.95)$$

где B – общее количество учитываемых частных показателей ТКИ; q_j – коэффициент значимости («весовой» коэффициент) показателя j.

Для обеспечения единообразного подхода к разнородным показателям ТКИ (размерным и безразмерным) применяется балльная система оценки их уровня (трех, пяти и т.д.). «Весовые» коэффициенты q_j устанавливают методом экспертных оценок, например, на основе значимости отдельных затрат в структуре технологической себестоимости изготовления детали. При этом должно соблюдаться условие:

$$\sum_{j=1}^{B} q_j = 1. \qquad (10.96)$$

Общий уровень ТКИ оценивается по аналогии с (10.93), (10.94):

$$\Delta K_{\Sigma} = П_{T\Sigma} - П_{T\Sigma\delta} \qquad (10.97а)$$

или

$$\Delta K_{\Sigma} = 1 - K_{T\Sigma}, \qquad (10.97б)$$

где $K_{T\Sigma} = П_{T\Sigma} / П_{T\Sigma\delta}$.

10.7.4. Расчет размеров исходной заготовки

При изготовлении гильз и технологически подобных им деталей в качестве исходных применяют полые цилиндрические заготовки с дном, получаемые способом вытяжки с утонением и штамповки дна. Эти заготовки имеют переменную по высоте толщину стенки (наименьшая толщина у кромки) и утолщенное дно. Для изготовления деталей другого назначения могут применяться трубные заготовки с постоянной по высоте толщиной стенки и без дна. Исходными данными для этого расчета служат размеры конечной штампованной заготовки.

Расчетные размеры (рис. 10.37):

- наружный диаметр D_0;
- толщина стенок в расчетных сечениях $S_0^{в}, S_0^{с}, ..., S_0^{j}, ..., S_0^{н}$;
- толщина дна $S_0^{д}$;
- расстояния расчетных сечений от установочной технологической базы (внутренней или наружной поверхности дна) $h_0^{в}, h_0^{с}, ..., h_0^{j}, ..., h_0^{н}$;
- радиусы сопряжения внутренних поверхностей стенки и дна r_0, R_0;
- полная высота H_0.

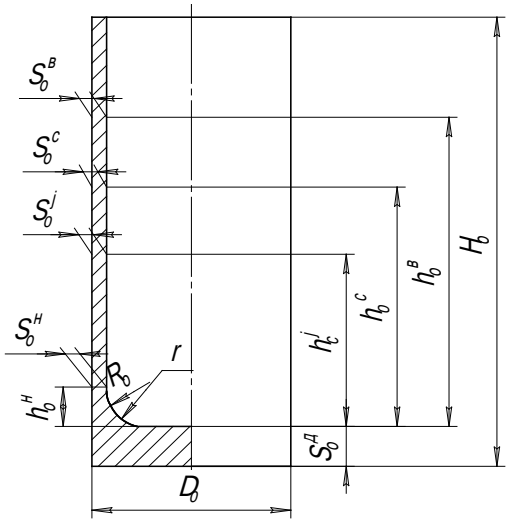


Рис. 10.37. Исходная заготовка для обжима

Алгоритм расчета.

1. Определение исходных данных: размеры конечной штампованной заготовки ($d_n^в, d_n^c, ..., d_n^j, ..., d_n^н$); толщины стенок в расчетных сечениях ($S_0^â, S_0^ñ, ..., S_0^j, ..., S_0^í, S_n^ä$); количество расчетных сечений j [l ; k]; расстояния расчетных сечений от внутренней поверхности дна ($h_0^â, h_0^ñ, ..., h_0^j, ..., h_0^í$); механические свойства материала в расчетных сечениях ($HV_n^â, HV_n^ñ, ..., HV_n^j, ..., HV_n^í, HV_n^ä$).

2. Определение формы исходной заготовки: цилиндрическая полая с дном и переменной по высоте толщиной стенки; трубная без дна с постоянной толщиной стенки; другие формы.

3. Расчет наружного диаметра D_0:

$$D_0 = d_n^н + 2(h_n^н + S_n^д)\text{tg}\beta, \tag{10.98}$$

где β – угол конусности корпуса.

Если наибольший наружный диаметр готовой детали соответствует ее цилиндрической части, недеформируемой в процессе обжима, то

$$D_0 = d_n^н; \beta = 0. \tag{10.99}$$

Если изготавливается деталь с выступающим фланцем, то

$$D_0 = d_{\text{пф}}, \tag{10.100}$$

где $d_{\text{пф}}$ – наружный диаметр конечной заготовки у основания фланца (под фланцем).

4. Определение толщин стенок в расчетных сечениях

$$S_0^{\text{в}} = c_1^{\text{в}} c_2^{\text{в}} S_n^{\text{в}}; S_0^{\text{с}} = c_2^{\text{с}} S_n^{\text{с}} \ldots S_0^j = c_2^j S_n^j; S_0^{\text{н}} = c_2^{\text{н}} S_n^{\text{н}}; S_0^{\text{д}} = S^{\text{д}}. \quad (10.101)$$

$$c_1^{\text{в}} = 0,95;\ c_1^{\text{с}} = c_1^j = c_1^{\text{н}} = 1,0; c_2^{\text{в}} = \sqrt{m_\Sigma^{\text{в}}}; c_2^{\text{с}} = \frac{m_\Sigma^{\text{с}} + \sqrt{m_\Sigma^{\text{с}}}}{2};$$
$$c_2^j = \frac{m_\Sigma^j + \sqrt{m_\Sigma^j}}{2}; c_2^{\text{н}} = m_\Sigma^{\text{н}}; m_\Sigma^{\text{в}} = \frac{d_n^{\text{в}}}{D_0}; m_\Sigma^{\text{с}} = \frac{d_n^{\text{с}}}{D_0}; \ldots; m_\Sigma^j = \frac{d_n^j}{D_0}; \ldots; m_\Sigma^{\text{н}} = \frac{d_n^{\text{н}}}{D_0} \quad (10.102)$$

– коэффициенты обжима (коэффициенты требуемой для обжима деформации).

5. Расстояния между расчетными сечениями устанавливаются из условия равенства деформируемых объемов металла, заключенных между соседними расчетными сечениями исходной и конечной заготовок:

$$\sum_{j=1}^{N} V_0^j = \sum_{j=1}^{N} V_n^j, \quad (10.103)$$

где V_0^j, V_n^j – объемы соответствующих конструктивных элементов исходной и конечной заготовок; N – количество конструктивных элементов.

При расчете размеров исходной заготовки приравниваются объемы, ограниченные нижним расчетным сечением, так как донная часть заготовки не участвует в обжиме.

Приближенный расчет полной высоты может быть выполнен по расчетной формуле

$$H_0 \approx h_n^{\text{н}} + S_n^{\text{д}} + 1,1\left[\frac{\left(d_{n\,\text{ср}}^{\text{н}}\right)^2 - \left(d_{n\,\text{ср}}^{\text{с}}\right)^2}{4\sin\beta\sqrt{\left(d_{n\,\text{ср}}^{\text{н}}\right)\left(d_{n\,\text{ср}}^{\text{с}}\right)}} + \frac{h_n^{\text{д}} d_{n\,\text{ср}}^{\text{в}} + \frac{\left(d_{n\,\text{ср}}^{\text{с}}\right)^2 - \left(d_{n\,\text{ср}}^{\text{в}}\right)^2}{4\sin\alpha}}{\sqrt{\left(d_{n\,\text{ср}}^{\text{с}}\right)\left(d_{n\,\text{ср}}^{\text{в}}\right)}}\right], \quad (10.104)$$

где $d_{n\,\text{ср}}^{\text{н}} = d_n^{\text{н}} - S_{n\,\text{ср}}$, $d_{n\,\text{ср}}^{\text{с}} = d_n^{\text{с}} - S_{n\,\text{ср}}$, $d_{n\,\text{ср}}^{\text{в}} = d_n^{\text{в}} - S_{n\,\text{ср}}^{\text{в}}$;

$$S_{n\,\text{ср}} = \frac{S_n^{\text{с}} + S_n^{\text{н}}}{2},\ S_{n\,\text{ср}}^{\text{в}} = \frac{S_n^{\text{с}} + S_n^{\text{в}}}{2}.$$

10.7.5. Расчет количества операций

Исходные данные:

- относительная толщина исходной заготовки S_0/D_0;
- угол конусности штампуемой детали α_n;

• среднее значение относительной разностенности исходной заготовки $\delta_S = \Delta S_{\max}/S_{\text{ср}}$, где $\Delta S_{\max} = S_{\max} - S_{\min}$ – абсолютная разностенность штампуемой заготовки; $S_{\max}, S_{\min}$ – максимальная и минимальная толщины стенки исходной заготовки;

• итоговый коэффициент обжима m_Σ;

• механические свойства материала заготовки $(\sigma_{\text{т}(0,2)}, \sigma_{\text{в}}, \varepsilon_{\text{ру}})$;

• относительная толщина дна исходной заготовки $S_0^{\text{д}}/S_0$;

• относительная высота исходной заготовки H_0/D_0;

• способ обжима (свободный, с подпором по наружной поверхности, с подпором по наружной и внутренней поверхности);

• предельные и допустимые коэффициенты обжима, устанавливаемые расчетным или опытным путем ($m_{\text{äîï}}$, $m_{\text{ïðåä}}$).

При определении количества операций обжима принимается следующий порядок расчета:

• оценка количества операций из условия устойчивости заготовки в начальный период деформации (в период внеконтактной деформации см. подразд. 10.4);

• оценка количества операций из условия устойчивости заготовки в период контактной деформации;

• выбор количества операций и распределение степеней деформации по операциям.

Оценка количества операций из условия обеспечения устойчивости деформируемой заготовки в начальный период неконтактной деформации.

Вначале проверяется возможность обжима за одну операцию (n = 1) по условию

$$\frac{S_0}{D_0} \geq \frac{k_{\text{уст}} k_{\text{н}}}{(1 - 0{,}5\delta_S)} \left[0{,}125\,\text{tg}(\alpha_n - \beta_n) + \frac{\text{tg}\,\frac{\alpha_n - \beta_n}{2}}{6\cos(\alpha_n - \beta_n)} \right]^2, \qquad (10.105)$$

где $k_{\text{уст}}$ – коэффициент запаса устойчивости, учитывающий влияние на складкообразование начальных несовершенств формы исходной заготовки (забоин, вмятин, царапин и др.); $k_{\text{уст}}$ = 2 при $\delta_S < 10\%$; $k_{\text{уст}}$ = 2…3 при $\delta_S < 40\%$; $k_{\text{уст}} > 3$ при $\delta_S \leq 40\%$; $k_{\text{н}}$ – коэффициент неравномерности пластической деформации по периметру штампуемой заготовки (при $\delta_S = 0, 10, 20, 30, 40, 50\%$ соответственно $k_{\text{н}}$ = 1; 1,02; 1,05; 1,25; 1,40); α_n, β_n – углы конусности ската и корпуса.

Если условие (10.105) не выполняется, то проверяется возможность обжима ее за две операции (n = 2).

Из (10.105) в зависимости от заданного значения S_0/D_0 определяется α_1. По величине α_1 и по принятому значению $h_{\text{ск1}} = h_{\text{ск}n}$ определяется коэффициент обжима на первой операции:

$$m_1 = 1 - \frac{2h_{\text{ск}}}{D_0}\operatorname{tg}\alpha_1. \qquad (10.106)$$

По величине S_0 и m_1 определяется толщина кромки заготовки после первого обжима

$$S_1 = \frac{S_0}{\sqrt{m_1}} \qquad (10.107)$$

затем значение относительной толщины заготовки после первого обжима $\left(S_1/d_1\right)$, где $d_1 = m_1 D_0$. После этого проверяется условие

$$\frac{S_1}{d_1} \geq \frac{k_{\text{уст}}k_{\text{н}}}{\left(1-0{,}5\delta_S\right)}\left[0{,}125\operatorname{tg}\left(\alpha_n-\beta_n\right)+\frac{\operatorname{tg}\dfrac{\alpha_n-\beta_n}{2}}{6\cos\left(\alpha_n-\beta_n\right)}\right]^2. \qquad (10.108)$$

Если условие (10.108) выполняется, то подтверждается принятое число операций (n = 2), если не выполняется, то проверяется возможность обжима за три операции (n = 3).

Из условия (10.108) определяется α_2:

$$\frac{S_1}{d_1} \geq \frac{k_{\text{уст}}k_{\text{н}}}{\left(1-0{,}5\delta_S\right)}\left[0{,}125\operatorname{tg}\left(\alpha_2-\beta_2\right)+\frac{\operatorname{tg}\dfrac{\alpha_2-\beta_2}{2}}{6\cos\left(\alpha_2-\beta_2\right)}\right]^2, \qquad (10.109)$$

где $\beta_2 = \beta_n$, после чего – коэффициент обжима на второй операции, толщина кромки после второй операции и относительная толщина заготовки:

$$m_2 = 1 - \frac{2h_{\text{ск}}}{D_0}\operatorname{tg}\alpha_2, \qquad (10.110)$$

$$S_2 = \frac{S_1}{\sqrt{m_2}}, \qquad (10.111)$$

$$\frac{S_2}{d_2}, \text{ где } d_2 = m_2 d_1. \qquad (10.112)$$

После этого проверяется условие

$$\frac{S_2}{d_2} \geq \frac{k_{\text{уст}} k_{\text{н}}}{(1-0{,}5\delta_S)} \left(0{,}125\,\text{tg}(\alpha_n - \beta_n) + \frac{\left(\text{tg}\frac{\alpha_n - \beta_n}{2}\right)}{6\cos(\alpha_n - \beta_n)} \right)^2. \qquad (10.113)$$

Если условие (10.113) выполняется, то подтверждается принятое количество операций, т.е. n = 3, если не выполняется, то проверяется возможность обжима за четыре операции и т.д.

На рис. 10.38 показана графическая интерпретация условий, определяющих границы устойчивой и неустойчивой деформации без учета коэффициента $k_{\text{н}}$.

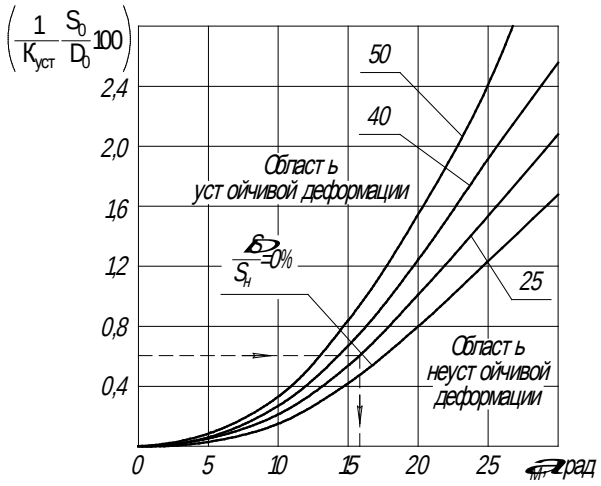


Рис. 10.38. Зависимость критической относительной толщины стенки заготовки от угла конусности матрицы и разностенности заготовки

Оценка количества операций из условия обеспечения устойчивости деформируемой заготовки в период контактной деформации. Проверка возможности обжима из условия продольной устойчивости в период контактной деформации.

Определение итогового коэффициента обжима в j-м (верхнем) расчетном сечении $m_{\Sigma}^{\text{в}}$:

$$m_{\Sigma}^{\text{в}} = \frac{d_n^{\text{в}}}{d_{n\text{ф}}}. \qquad (10.114)$$

Проверка условия

$$m_{\Sigma}^{\text{в}} \geq m_{\text{доп}}, \qquad (10.115)$$

где

$$m_{\text{доп}} = 2\left(1-\psi_{\text{у}}\right) - \sqrt{\left(1-2\psi_{\text{у}}\right)^2 + \frac{1{,}6\sigma_{\text{кр}}\cos\alpha_n - k\left(1-\psi_{\text{у}}\right)^2}{\sigma_{\text{в}}^{\text{с}}\left(1+f\text{ctg}\alpha_n\right)\left(3-2\cos\alpha_n\right)}}, \qquad (10.116)$$

где $\sigma_{\text{кр}} = \sigma_{0,2}^{\text{с}}$ при $\frac{S_0^{\text{с}}}{D_0} > 0{,}005$ и свободном обжиме; $\sigma_{\text{кр}} = \frac{\left(\sigma_{0,2}^{\text{с}} + \sigma_{\text{в}}\right)}{2}$ при $S_0^{\text{с}}/D_0 = 0{,}05\ldots0{,}015$ и обжиме с подпором по наружной поверхности; $\sigma_{\text{кр}} = \sigma_{\text{в}}^{\text{с}}$ при $S_0^{\text{с}}/D_0 > 0{,}015$ и обжиме с подпором по наружной поверхности;

$$k = 1{,}5\frac{\sigma_{\text{в}}^{\text{с}}}{\left(1-\psi_{\text{у}}\right)^2}\left(1{,}35-2\psi_{\text{у}}\right)\sqrt{\frac{S_0^{\text{в}}}{D_0}}\sin\alpha_n,$$

где $\psi_{\text{у}}$ – относительное равномерное сужение; $\sigma_{\text{в}}$ – временное сопротивление (предел прочности); f – коэффициент трения.

Для приближенной оценки можно принимать $\sigma_{\text{кр}} = \sigma_{0,2}^{\text{с}}$, где $\sigma_{0,2}^{\text{с}}$ – условный (или физический) предел текучести.

Если условие (10.115) выполняется, то подтверждается принятое выше количество операций (n = 1), если не выполняется, то проверяется возможность обжима за две операции (n = 2).

Принимается

$$m_1^{\text{в}} = m_2^{\text{в}} = \sqrt{m_{\Sigma}^{\text{в}}}. \qquad (10.117)$$

Проверяется условие

$$m_1^{\text{в}} > 1{,}1m_{1\text{доп}}, \qquad (10.118)$$

где $m_{1\text{доп}}$ определяется по формуле

$$m_{1\text{доп}} = 2\left(1-\psi_{\text{у}}\right) - \sqrt{\left(1-2\psi_{\text{у}}\right)^2 + \frac{1{,}6\sigma_{\text{кр}}\cos\alpha_1 - k\left(1-\psi_{\text{у}}\right)^2}{\sigma_{\text{в}}^{\text{с}}\left(1+f\text{ctg}\alpha_1\right)\left(3-2\cos\alpha_1\right)}}. \qquad (10.119)$$

Если условие выполняется, n = 2 и промежуточный отжиг не назначается.

Принимается

$$h_{\text{ск1}} = h_{\text{ск2}}; \alpha_1 = \alpha_{\text{опт}}. \qquad (10.120)$$

Если $\alpha_{\text{опт}} < \alpha_n$, то

$$\alpha_{\text{опт}} = \arcsin\sqrt[3]{f/2.} \qquad (10.121)$$

Если $\alpha_{\text{опт}} > \alpha_n$, то

$$\alpha_1 = \alpha_n, \alpha_2 = \alpha_n. \qquad (10.122)$$

Если

$$m_{1\text{доп}} < m_1^{\text{в}} < 1{,}1 m_{1\text{доп}}, \qquad (10.123)$$

то принимается $n = 2$ с промежуточным рекристаллизационным отжигом обжимаемой части заготовки.

Если условия (10.117), (10.119), (10.123) не выполняются, то проверяется возможность обжима за $n = 3$, из условия продольной устойчивости.

Принимается

$$m_1^{\text{в}} = m_2^{\text{в}} = m_3^{\text{в}} = \sqrt[3]{m_{\Sigma}^{\text{в}}}. \qquad (10.124)$$

Проверяется условие

$$m_1^{\text{в}} > 1{,}1 m_{1\text{доп}}, \qquad (10.125)$$

где $m_{1\text{доп}}$ определяется по формуле (10.106).

Одновременно назначается отжиг между первым и вторым обжимами. Если $m_{1\text{доп}} < m_1^{\text{в}} < 1{,}1 m_{1\text{доп}}$, то принимается $n = 3$ и между 1-, 2-, 3-м обжимами вводится отжиг.

Оценка возможности обжима из условия поперечной устойчивости деформируемой заготовки в период контактной деформации. Принимается значение

$$m_{\Sigma}^{\text{в}} = \frac{d_n^{\text{в}}}{D_0} \geq m_{1\text{доп}}, \qquad (10.126)$$

где $m_{1\text{доп}}$ – допустимый коэффициент обжима на первой операции.

Допустимое значение коэффициента обжима определяется по формуле

$$m_{1\text{доп}} = \exp\left[-\frac{1}{b} \left(e_{i\text{y}}\right)_{1\text{доп}} \right], \qquad (10.127)$$

где $b = 2/\sqrt{3} \ldots 1{,}0$ – коэффициент, учитывающий вид деформированного состояния (для зоны дульца $b = 1{,}0$, для зон корпуса $b = 2/\sqrt{3}$); $\left(e_{i\text{y}}\right)_{1\text{доп}} = \bar{e}_{i\text{y}} - 3S_e = \bar{e}_{i\text{y}}\left(1 - 3V_e\right)$ – допустимая степень деформации, $\bar{e}_{i\text{y}}$ – среднее значение предельной деформации; S_{ei}, V_{ei} – числовые параметры распределения (среднее квадратичное отклонение выборки, коэффициент вариации V_{ei} = = 0,025…0,040).

Следовательно,

$$m_{1\text{доп}} = \exp\left[-\frac{1}{b} \frac{\bar{e}_{i\text{y}}}{e_{i\text{доп}}} \left(1 - 3V_e\right) \right], \qquad (10.128)$$

где $e_{i\text{äîï}} = e_{i\text{ïð}}$ (см. формулы (10.49)…(10.57)).

Значение $\bar{e}_{iy}$ является функциональным, зависящим от действия основных технологических факторов, и может быть описано полиномом второй степени (подразд. 10.4):

$$\bar{e}_{iy} = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i x_i + \sum_{i<j=1}^{k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{k} b_{ii} x_i^2, \qquad (10.129)$$

где $x_{i,j}$ – основные технологические факторы (S_0, e_{i0}, T, m_σ); b_0, b_i – коэффициенты регрессии; S_0 – толщина исходной заготовки; e_{i0} – степень предварительной деформации; $T = t/100$; t – температура нагрева заготовки при термообработке; $m_\sigma = \dfrac{\sigma_\rho}{\sigma_i}$ – коэффициент, характеризующий влияние второго главного напряжения, пределы его изменения $m_\sigma = 0\ldots0{,}8$, наименьшее значение у кромки, наибольшее в среднем и промежуточном, j-м, расчетных сечениях при больших деформациях.

При введении в матрицу обжимного стержня повышается устойчивость края заготовки ввиду создания жесткого подпора по внутренней поверхности. В этом случае в формулу (10.128) вводится поправочный коэффициент $K_e \approx 1{,}5$:

$$m_{1\text{ãîì}} = \exp\left[-\frac{1{,}5e_{iy}\left(1-3V_{ei}\right)}{be_{i\text{ãîì}}}\right]. \qquad (10.130)$$

Степень предварительной деформации e_{i0} в модели (10.56) определяется с учетом технологического маршрута изготовления детали для рассматриваемого расчетного сечения j, в частности маршрута технологического процесса обжима. В соответствии со схемами формирования механических свойств детали и с применением моделей (10.89) и (10.90) в зависимости от значения характеристики механических свойств (например, HV^j) в любом расчетном сечении j находится величина суммарной деформации. Тогда предварительная деформация будет равна:

$$e_{i0} = e_{i\Sigma} - \left(e_i^j{}_{\text{об}}\right)_\Sigma, \qquad (10.131)$$

где $\left(e_i^j{}_{\text{об}}\right)_\Sigma = b\ln\dfrac{1}{m_\Sigma}$ – суммарная на всех обжимах степень деформации в расчетном сечении j (m_Σ определяется из (10.126).

Если условие (10.126) выполняется, то подтверждается принятое количество операций: $n = 1$, если не выполняется, то проверяется возможность обжима за две операции без промежуточного отжига из условия поперечной устойчивости:

$$m_1^{\text{в}} = m_{1\text{доп}}, \qquad (10.132)$$

$$m_2^{\text{в}} = \frac{m_\Sigma^{\text{в}}}{m_1^{\text{в}}}. \qquad (10.133)$$

При этом $$m_2^{\text{в}} \geq m_{2\text{доп}} = \exp\left[-\frac{1}{b}\left(e_{i\text{у}}\right)_{2\text{доп}}\right]. \qquad (10.134)$$

Если условие (10.134) не выполняется, то проверяется возможность обжима за три операции (n = 3).

Принимается

$$m_1^{\text{в}} = m_{1\text{доп}}^{\text{в}}; \quad m_2^{\text{в}} = m_{2\text{доп}}^{\text{в}}, \qquad (10.135)$$

где $m_{2\text{доп}}$ определяется по (10.134):

$$m_3^{\text{в}} = \frac{m_\Sigma^{\text{в}}}{m_1^{\text{в}} m_2^{\text{в}}}. \qquad (10.136)$$

При этом должно соблюдаться условие

$$m_{3\ \text{доп}}^{\text{в}} \geqslant m_3 \quad = \exp\left[-\frac{1}{b}\left(e_i\right)_{3\text{доп}}\right], \qquad (10.137)$$

при выполнении которого назначаются три обжима.

Допустимые значения предельной до потери устойчивости деформации на последующих обжимах определяются также по математической модели (10.129) для конкретных материалов с учетом увеличивающейся степени предварительной деформации, т.е. по формуле (10.131):

$$e_{i0} = e_{i\Sigma} - \left(e_{i-1}\right)_{\text{об}\Sigma}, \qquad (10.138)$$

где $\left(e_{i-1}\right)_{\text{об}\Sigma} = \sum_1^{i-1} e_{i\,\text{об}}$.

После проведения расчетов число операций принимается равным наибольшему установленному значению, при этом углы конусности матриц назначаются меньшими или равными значениям, установленным из условия устойчивости заготовки в начальной стадии обжима.

Расчет количества операций, как правило, выполняется по верхнему расчетному сечению. Однако следует иметь в виду, что при больших значениях угла β (конусности корпуса) для этого участка заготовки потребуются большие деформации в верхней части корпуса, который предварительно сильно наклепан на вытяжке. В таком случае может потребоваться и оценка числа операций не только по верхнему, но и по средним расчетным сечениям.

При этом должны соблюдаться условия

$$m_\Sigma = m_1 m_2 \ldots m_n, \qquad m_1 < m_2 \leq \quad \leq m_n \qquad (10.139)$$

Блок-схема алгоритма расчета количества операций приведена на рис. 10.39.

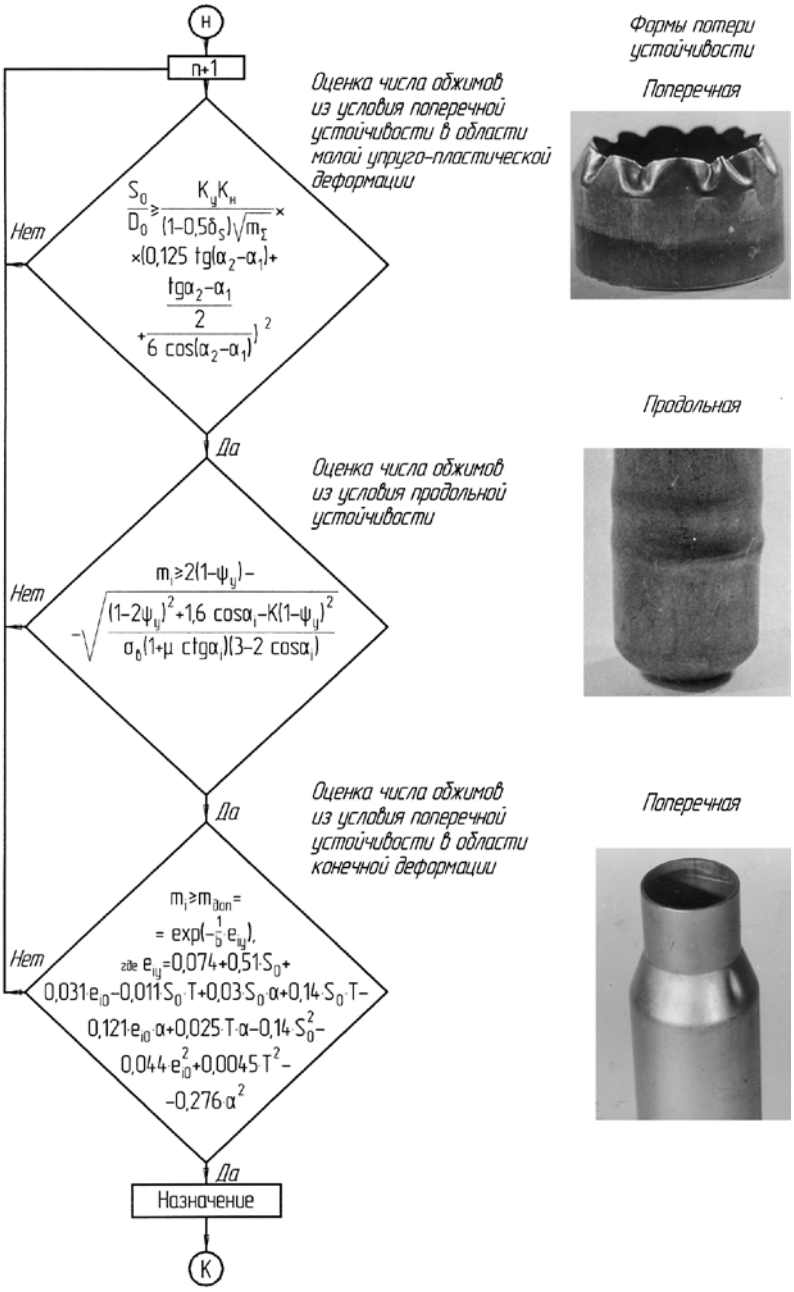


Рис. 10.39. Алгоритм расчета количества операций при обжиме

10.7.6. Расчет размеров заготовки после промежуточных операций

Исходные данные:

- размеры исходной заготовки $(D_0, H_0, S_0^j, S_0^д, h_0^j,\ j=1,2,...,k)$;
- количество операций *n*;
- коэффициенты обжима по операциям в расчетных сечениях

$(m_1^в, m_2^в, ...m_n^в, m_1^с, m_2^с, ..., m_n^с, m_1^j, m_2^j, ..., m_n^j, m_\Sigma^в, m_\Sigma^с, m_\Sigma^н)$;

- углы конусности матриц по операциям $(\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n, \beta_1, \beta_2, ..., \beta_n)$.

Расчетные размеры заготовок по операциям (рис. 10.40):

- наружные диаметры заготовок в расчетных сечениях

$(d_1^в, d_2^в, ..., d_n^в; d_1^с, d_2^с, ..., d_n^с; d_1^j, d_2^j, ..., d_n^j; d_1^н, d_2^н, ..., d_n^н)$;

- толщины стенки заготовки в расчетных сечениях

$(S_1^в, S_2^в, ..., S_n^в; S_1^с, S_2^с, ..., S_n^с; S_1^j, S_2^j, ..., S_n^j; S_1^н, S_2^н, ..., S_n^н)$;

- расстояния расчетных сечений от внутренней поверхности дна заготовки$(h_1^н, h_2^н, ..., h_n^н; h_1^j, h_2^j, ..., h_n^j; h_1^с, h_2^с, ..., h_n^с; h_1^в, h_2^в, ..., h_n^в)$ и высоты конструктивных элементов заготовки;
- высоты заготовки $(H_1, H_2, ..., H_n)$.

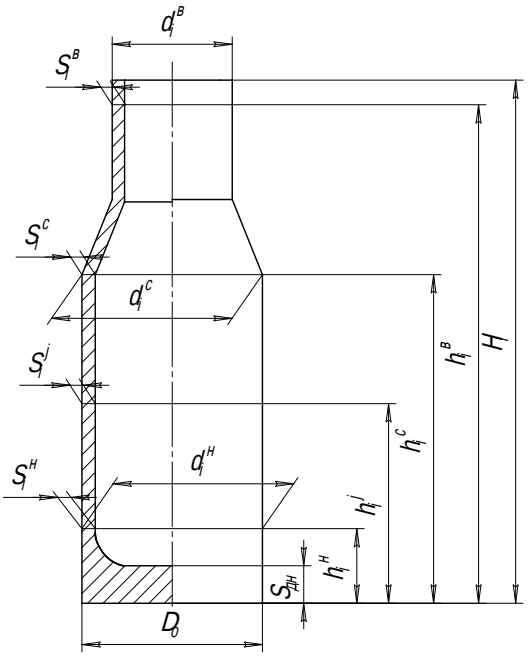


Рис. 10.40. Эскиз заготовки после промежуточного обжима

Размеры заготовок по операциям определяются в зависимости от размеров исходной заготовки с учетом принятых по операциям и в расчетных сечениях коэффициентов обжима, геометрии рабочего инструмента и условия постоянства объема заготовки до и после обжима.

Последовательность расчета и расчетные формулы приведены в табл. 10.8.

Таблица 10.8

Расчет размеров заготовок по операциям при обжиме

Определяемая величина	Расчетная формула	Примечание
1	2	3
Наружный диаметр заготовки в верхнем расчетном сечении:		
на первой операции, $d_1^{\text{в}}$	$d_1^{\text{в}} = m_1^{\text{в}} D_0$	
на второй, $d_2^{\text{в}}$	$d_2^{\text{в}} = m_2^{\text{в}} d_1^{\text{в}} = m_{2\Sigma}^{\text{в}} D_0$	$m_{2\Sigma}^{\text{в}} = m_1^{\text{в}} m_2^{\text{в}}$
на последней, $d_n^{\text{в}}$	$d_n^{\text{в}} = m_n^{\text{в}} d_{n-1}^{\text{в}} = m_{n\Sigma}^{\text{в}} D_0$	$m_{n\Sigma}^{\text{в}} = m_1^{\text{в}} m_2^{\text{в}} \ldots m_n^{\text{в}}$
Наружный диаметр заготовки в среднем расчетном сечении:		
на первой операции, $d_1^{\text{с}}$	$d_1^{\text{с}} = m_1^{\text{с}} D_0$	
на второй, $d_2^{\text{с}}$	$d_2^{\text{с}} = m_2^{\text{с}} d_1^{\text{с}} = m_{2\Sigma}^{\text{с}} D_0$	$m_{2\Sigma}^{\text{с}} = m_1^{\text{с}} m_2^{\text{с}}$
на последней, $d_n^{\text{с}}$	$d_n^{\text{с}} = m_n^{\text{с}} d_{n-1}^{\text{с}} = m_{n\Sigma}^{\text{с}} D_0$	$m_{n\Sigma}^{\text{с}} = m_1^{\text{с}} m_2^{\text{с}} \ldots m_n^{\text{с}}$
Наружный диаметр заготовки в любом (j_m) расчетном сечении:		
на первой операции, d_1^j	$d_1^j = m_1^j D_0$	
на второй, d_2^j	$d_2^j = m_2^j d_1^j = m_{2\Sigma}^j D_0$	$m_{2\Sigma}^j = m_1^j m_2^j$
на последней, d_n^j	$d_n^j = m_n^j d_{n-1}^j = m_{n\Sigma}^j D_0$	$m_{n\Sigma}^j = m_1^j m_2^j \ldots m_n^j$
Наружный диаметр заготовки в нижнем расчетном сечении:		
на первой операции, $d_1^{\text{н}}$	$d_1^{\text{н}} = D_0 - 2\left(h_1^{\text{н}} + S_1^{\text{д}}\right)\text{tg}\beta_1$	$S_1^{\text{д}} = S_2^{\text{д}} = \ldots = S_n^{\text{д}}$
на второй, $d_2^{\text{н}}$	$d_2^{\text{н}} = D_0 - 2\left(h_2^{\text{н}} + S_2^{\text{д}}\right)\text{tg}\beta_2$	
на последней, $d_n^{\text{н}}$	$d_n^{\text{н}} = D_0 - 2\left(h_n^{\text{н}} + S_n^{\text{д}}\right)\text{tg}\beta_n$	
Расстояние нижнего расчетного сечения от внутренней поверхности дна	$h_1^{\text{н}} = h_2^{\text{н}} = \ldots = h_n^{\text{н}}$	Назначается по чертежу готовой детали
Угол конусности корпусной части заготовки:		
на первой операции, β_1		$\Delta\beta_1 > \Delta\beta_2 > \ldots > \Delta\beta_{n+1}$
на второй, β_2	$\beta_2 = \beta_1 + \Delta\beta_1$	$\beta_1 + \Delta\beta_1 + \Delta\beta_2 + \ldots + \Delta\beta_{n-1} = \beta_n$
на последней, β_n	$\beta_1 = \beta_{n-1} + \Delta\beta_{n-1}$	

Продолжение табл. 10.8

1	2	3
Угол конусности заготовки в зоне ската: на первой операции, α_1 на второй, α_2 на последней, α_n	$\alpha_1 \le [\alpha_1]$ $\alpha_2 \le [\alpha_2]$ $\alpha_n = \alpha$	$[\alpha_1]$,$[\alpha_2]$ – рассчитываются по формулам (10.120)…(10.122)
Толщина торцевой кромки дульца после обжима: на первой операции, $S_1^{\text{кр}}$ на второй, $S_2^{\text{кр}}$ на последней, $S_n^{\text{кр}}$	$S_1^{\text{кр}} = \frac{S_0}{\sqrt{m_1^{\text{в}}}}$ $S_2^{\text{кр}} = \frac{S_1^{\text{кр}}}{\sqrt{m_2^{\text{в}}}} = \frac{S_0}{\sqrt{m_{2\Sigma}^{\text{в}}}}$ $S_n^{\text{кр}} = \frac{S_{n-1}^{\text{кр}}}{\sqrt{m_n^{\text{в}}}} = \frac{S_0}{\sqrt{m_{n\Sigma}^{\text{в}}}}$	–
Максимальная толщина стенки дульца после обжима: на первой операции, $S_{\max 1}^{\text{в}}$ на второй, $S_{\max 2}^{B}$ на последней, $S_{\max n}^{\text{в}}$	$S_{\max 1}^{\text{в}} = \frac{S_0}{m_1^{B}}$ $S_{\max 2}^{\text{в}} = \frac{S_{\max 1}^{\text{в}}}{m_2^{\text{в}}} = \frac{S_0}{m_{2\Sigma}^{\text{в}}}$ $S_{\max n}^{\text{в}} = \frac{S_{\max n-1}^{\text{в}}}{m_n^{\text{в}}} = \frac{S_0}{m_{n\Sigma}^{\text{в}}}$	–
Толщина стенки дульца после калибровки: на первой операции, $S_1^{\text{д}}$ на второй, $S_2^{\text{д}}$ на последней, $S_n^{\text{д}}$	$S_1^{\text{д}} = C_{31}^{\text{в}} S_{\max 1}^{\text{в}}$ $S_2^{\text{д}} = C_{32}^{\text{в}} S_{\max 2}^{\text{в}}$ $S_n^{\text{д}} = S^{\text{в}}$	Назначается по чертежу готовой детали
Коэффициент утонения: на первой операции, $C_{31}^{\text{в}}$ на второй, $C_{32}^{\text{в}}$ на последней, $C_{3n}^{\text{в}}$	$C_{31}^{\text{в}} = 0{,}98$ $C_{32}^{\text{в}} = 0{,}98$ $C_{3n}^{\text{в}} = 0{,}90$	Назначается по опытным данным
Толщина стенки в среднем расчетном сечении: на первой операции, $S_1^{\text{с}}$ на второй, $S_2^{\text{с}}$ на последней, $S_n^{\text{с}}$	$S_1^{\text{с}} \approx \frac{S_0}{\frac{1}{2}\left(m_1^{\text{с}} + \sqrt{m_1^{\text{с}}}\right)}$ $S_2^{\text{с}} \approx \frac{S_0}{\frac{1}{2}\left(m_2^{\text{с}} + \sqrt{m_2^{\text{с}}}\right)}$ $S_n^{\text{с}} = S^{\text{с}}$	Назначается по чертежу готовой детали
Толщина стенки в нижнем расчетном сечении на любой операции, $S_i^{\text{н}}$	$S_i^{\text{н}} = S^{\text{н}}$	Назначается по чертежу готовой детали на всех операциях

Окончание табл. 10.8

1	2	3
Высота заготовки: на первой операции, H_1 на второй, H_2 на последней, H_n	$H_1 = S^{д} + h_1^{с} + h_{ск} + h_1^{д}$ $H_2 = S^{д} + h_2^{с} + h_{ск} + h_2^{д}$ $H_n = H + \Delta H$	Назначается по чертежу готовой детали с учетом припусков на подрезку
Расстояние среднего расчетного сечения от внутренней поверхности дна	$h_1^{с} = h_2^{с} = ... = h_n^{с} = h^{с}$	Назначается по чертежу готовой детали. Более точно определяется из условия равенства объемов
Высота ската: на первой операции, $h_{ск1}$ на второй, $h_{ск2}$ на последней, $h_{скn}$	$h_{ск1} = \frac{d_1^{с} - d_1^{в}}{2\mathrm{tg}\alpha_1}$ $h_{ск2} = \frac{d_2^{с} - d_2^{в}}{2tg\alpha_2}$ $h_{скn} = h_{ск}$	Целесообразно выполнять условие $h_{ск1} > h_{ск2} > ... > h_{скn}$ Назначается по чертежу готовой детали
Высота дульца: на первой операции, $h_1^{д}$ на второй, $h_2^{д}$ на последней, $h_n^{д}$	$h_1^{д} \approx \frac{H_0 - \left(S_1^{д} + h_1^{с}\right)}{\sqrt{m_1^{в}}} - \frac{\left(d_{1ср}^{с}\right)^2 - \left(d_{1ср}^{в}\right)^2}{4\sin\alpha_1}$ $h_2^{д} \approx \frac{H_0 - \left(S_2^{д} + h_2^{с}\right)}{\sqrt{m_{2\Sigma}^{в}}} - \frac{\left(d_{2ср}^{с}\right)^2 - \left(d_{2ср}^{в}\right)^2}{4\sin\alpha_2}$ $h_n^{д} \approx \frac{H_0 - \left(S_n^{д} + h_n^{с}\right)}{\sqrt{m_{n\Sigma}^{в}}} - \frac{\left(d_{nср}^{с}\right)^2 - \left(d_{nср}^{в}\right)^2}{4\sin\alpha_n}$	Более точно определяется по теореме Гюльдена
Средний диаметр заготовки в верхнем расчетном сечении: на первой операции, $d_{1ср}^{в}$ на второй, $d_{2ср}^{в}$ на последней, $d_{nср}^{в}$	$d_{1ср}^{в} = d_1^{в} - S_{1ср}$ $d_{2ср}^{в} = d_2^{в} - S_{2ср}$ $d_{nср}^{в} = d_n^{в} - S_{nср}$	–
Средняя толщина стенки: на первой операции, $S_{1ср}^{в}$ на второй, $S_{2ср}^{в}$ на последней, $S_{nср}^{В}$	$S_{1ср}^{в} = \frac{S_1^{в} + S_1^{с}}{2}$ $S_{2ср}^{в} = \frac{S_2^{в} + S_2^{с}}{2}$ $S_{nср}^{в} = \frac{S_n^{в} + S_n^{с}}{2}$	–
Средний диаметр заготовки в среднем расчетном сечении: на первой операции, $d_{1ср}^{с}$ на второй, $d_{2ср}^{с}$ на последней, $d_{nср}^{с}$	$d_{1ср}^{с} = d_1^{с} - S_{1ср}^{с}$ $d_{2ср}^{с} = d_2^{с} - S_{2ср}^{с}$ $d_{nср}^{с} = d_n^{с} - S_{nср}^{с}$	–

10.7.7. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента

Исходные данные:

- чертеж конечной заготовки (после последнего обжима);
- размеры заготовок на операциях.

Расчетные исполнительные размеры (рис. 10.41, 10.42):

- диаметры матрицы в расчетных и контрольных сечениях $\left(d^{\text{в}}_{\text{м}i}, d^{\text{с}}_{\text{м}i}, d^{\text{н}}_{\text{м}i}, d^{j}_{\text{м}i}\right)$;
- высота конструктивных элементов матрицы $\left(h^{\text{с}}_{\text{м}i}, h^{\text{ск}}_{\text{м}}, H_{\text{м}i} - h^{\text{с}}_{\text{м}i}, h^{\text{н}}_{\text{м}i}\right)$;
- диаметры обжимных стрежней $\left(d_{\text{об}i}\right)$;
- углы конусности матрицы $\left(\alpha_{\text{м}i}, \beta_{\text{м}i}\right)$;
- радиусы скругления $\left(R_{\text{м}i}, r^{\text{с}}_{\text{м}i}, r^{\text{д}}_{\text{м}i}, r^{\text{в}}_{\text{м}i}\right)$.

Размеры матрицы на последнем обжиме назначаются по номинальным размерам конечной заготовки с учетом допусков на изготовление детали, степени и направления износа рабочего инструмента, упругой разгрузки заготовки и допусков на изготовление рабочего инструмента.

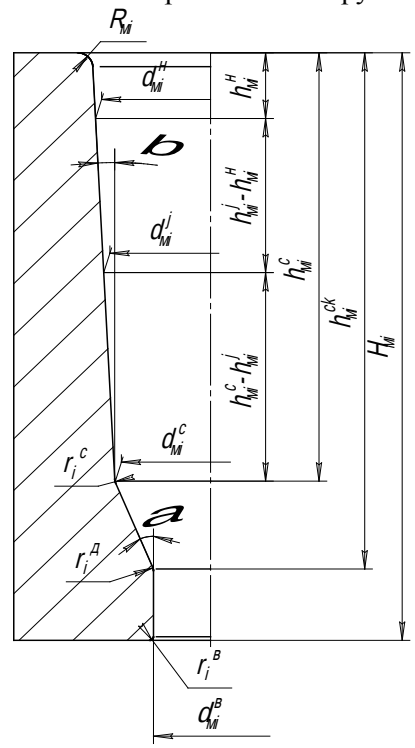


Рис. 10.41. Расчетные исполнительные размеры матрицы

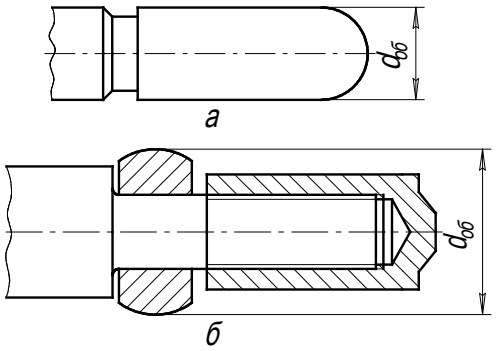


Рис. 10.42. Варианты конструктивного исполнения обжимных стержней

Размеры матриц на промежуточных операциях назначаются по соответствующим номинальным размерам заготовок с учетом допусков на изготовление матриц.

Последовательность расчета и расчетные формулы приведены в табл. 10.9.

Таблица 10.9

Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента

Определяемая величина	Расчетная формула	Примечание
1	2	3
Диаметр матрицы в верхнем расчетном сечении в дульцевой части:		
на первой операции, $d^{в}_{м1}$	$d^{в}_{м1} = \left(d^{в}_{1}\right) + T_{м}$	–
на i–й, $d^{в}_{мi}$	$d^{в}_{мi} = \left(d^{в}_{i}\right) + T_{м}$	
на последней, $d^{в}_{мn}$	$d^{в}_{мn} = \left(d^{в}_{n\max} - П^{в}_{изм} - \delta^{в}_{у}\right) + T_{м}$	
Максимальный наружный диаметр заготовки в верхнем расчетном сечении на последнем обжиме, $d^{в}_{n\max}$	$d^{в}_{n\max} = d^{в}_{n} + T^{в}_{nв}$	При $T^{в}_{n} = 0$, $d^{в}_{n\max} = d^{в}_{n}$
Верхнее отклонение на размер, $d^{в}_{n}, T^{в}_{nв}$		Назначается по чертежу готовой детали и конечной штампованной заготовки
Припуск на износ матрицы, $П^{в}_{изн}$	$П^{в}_{изн} = 0{,}8П^{в}_{д}$	
Поле допуска, $П^{в}_{д}$	$П^{в}_{д} = T^{в}_{nв} - T^{в}_{nн}$	При $T^{в}_{nв} = 0, П^{в}_{д} = T^{в}_{nн}$
Нижнее отклонение на размер, $d^{в}_{n}, T^{в}_{nн}$		Назначается по чертежу готовой детали и конечной штампованной заготовки
Допуск на изготовление матрицы, $T_{м}$		Назначается по 6…8-му квалитетам
Упругая разгрузка (распружинивание), $\delta^{в}_{у}$	$\delta^{в}_{у} \approx (0{,}007...0{,}015) d^{в}_{n}$	Назначается по опытным данным

Продолжение табл. 10.9

1	2	3
Диаметр матрицы в среднем расчетном сечении (у ската): на первой операции, $d^{\text{с}}_{\text{м}1}$ на i–й, $d^{\text{с}}_{\text{м}i}$ на последней, $d^{\text{с}}_{\text{м}n}$	$d^{\text{с}}_{\text{м}1} = \left(d^{\text{с}}_{1}\right) + T_{\text{м}}$ $d^{\text{с}}_{\text{м}i} = \left(d^{\text{с}}_{i}\right) + T_{\text{м}}$ $d^{\text{с}}_{\text{м}n} = \left(d^{\text{с}}_{n\max} - П^{\text{с}}_{\text{изм}} - \delta^{\text{с}}_{\text{у}}\right) + T_{\text{м}}$	$d^{\text{с}}_{\text{м}n} = d^{\text{с}}_{n} K_2$ $K_2 = 0{,}985...0{,}993$
Максимальный наружный диаметр заготовки после последнего обжима в среднем расчетном сечении, $d^{\text{с}}_{n\max}$	$d^{\text{с}}_{n\max} = d^{\text{с}}_{n} + T^{\text{с}}_{n\text{в}}$	–
Верхнее отклонение на размер, $T^{\text{с}}_{n\text{в}}$		Назначается по чертежу готовой детали (если $T^{\text{с}}_{n\text{в}} = 0$ то $d^{\text{с}}_{n\max} = d^{\text{с}}_{n}$)
Припуск на износ, $П^{\text{с}}_{\text{изн}}$	$П^{\text{с}}_{\text{изн}} = 0{,}8П^{\text{с}}_{\text{д}}$	–
Поле допуска, $П^{\text{с}}_{\text{д}}$	$П^{\text{с}}_{\text{д}} = T^{\text{с}}_{n\text{в}} - T^{\text{с}}_{n\text{н}}$	При $T^{\text{с}}_{n\text{н}} = 0$, $П^{\text{с}}_{\text{д}} = T^{\text{с}}_{n\text{в}}$
Верхнее отклонение на размер, $T^{\text{с}}_{n\text{в}}$		Назначается по чертежу готовой детали и конечной штампованной заготовки
Упругая разгрузка (распружинивание), $\delta^{\text{с}}_{\text{у}}$	$\delta^{\text{с}}_{\text{у}} \approx (0{,}007...0{,}015) d^{\text{с}}_{n}$	Назначается по опытным данным
Диаметр матрицы в нижнем расчетном сечении: на первой операции, $d^{\text{н}}_{\text{м}1}$ на i–й, $d^{\text{н}}_{\text{м}i}$ на последней, $d^{\text{н}}_{\text{м}n}$	$d^{\text{н}}_{\text{м}1} = \left(d^{\text{н}}_{1}\right) + T_{\text{м}}$ $d^{\text{н}}_{\text{м}i} = \left(d^{\text{н}}_{i}\right) + T_{\text{м}}$ $d^{\text{н}}_{\text{м}n} = \left(d^{\text{н}}_{n\max} - П^{\text{н}}_{\text{изм}} - \delta^{\text{н}}_{\text{у}}\right) + T_{\text{м}}$ или $d^{\text{н}}_{\text{м}n} = d^{\text{н}}_{n} K_3;\ K_3 = 0{,}984...1{,}0$	$П^{\text{н}}_{\text{изн}} = (0{,}2...0{,}8) П^{\text{н}}_{\text{д}}$ $П^{\text{н}}_{\text{д}} = T^{\text{н}}_{n\text{в}} - T^{\text{н}}_{n\text{н}}$ При $T^{\text{н}}_{n\text{в}} = 0$, $П^{\text{н}}_{\text{д}} = T^{\text{н}}_{n\text{н}}$ $d^{\text{н}}_{\text{м}n-1} = d^{\text{н}}_{n} + (0{,}01...0{,}03)$ *мм* $d^{\text{н}}_{\text{м}n-2} = d^{\text{н}}_{n-1} + (0{,}01...0{,}08)$ *мм*
Максимальный наружный диаметр заготовки в нижнем расчетном сечении, $d^{\text{н}}_{n\max}$	$d^{\text{н}}_{n\max} = d^{\text{н}}_{n} + T^{\text{н}}_{n\text{в}}$	При $T^{\text{н}}_{n\text{в}} = 0$, $d^{\text{н}}_{n\max} = d^{\text{н}}_{n}$
Верхнее отклонение на размер, $T^{\text{н}}_{n\text{в}}$		Назначается по чертежу готовой детали и конечной штампованной заготовки

Окончание табл. 10.9

1	2	3
Расстояние до нижнего расчетного сечения: на первой операции, $h^{\text{н}}_{\text{м}1}$ на i–й, $h^{\text{н}}_{\text{м}i}$ на последней, $h^{\text{н}}_{\text{м}n}$	$h^{\text{н}}_{\text{м}1} \approx R_1 \approx 5...7$ мм $h^{\text{н}}_{\text{м}i} \approx R_i / 2{,}5$ $h^{\text{н}}_{\text{м}n} = h^{\text{н}}_n + h^{\text{д}}_n$	$h^{\text{д}}_n = 1{,}5$ – для гильз без выступающего фланца, $h^{\text{д}}_n = 0{,}4$ – для гильз с выступающим фланцем при $d^{\text{н}}_n < 10$ мм
Радиус входной кромки матрицы, R_1, R_i, R_n		Назначается по опытным данным
Расстояние до среднего расчетного сечения: на первой операции, $h^{\text{с}}_{\text{м}1}$ на i–й, $h^{\text{с}}_{\text{м}i}$ на последней, $h^{\text{с}}_{\text{м}n}$	$h^{\text{с}}_{\text{м}1} = \dfrac{h^{\text{н}}_{\text{м}1} + (h^{\text{с}}_1 - h^{\text{н}}_1)}{1{,}02}$ $h^{\text{с}}_{\text{м}i} = \dfrac{h^{\text{н}}_{\text{м}i} + (h^{\text{с}}_i - h^{\text{н}}_i)}{1{,}01}$ $h^{\text{с}}_{\text{м}n} = [h^{\text{н}}_{\text{м}n} + (h^{\text{с}}_n - h^{\text{н}}_n)]0{,}999$	Расстояния между расчетными сечениями $(h^{\text{с}}_1 - h^{\text{н}}_1)$ $(h^{\text{с}}_i - h^{\text{н}}_i), (h^{\text{с}}_n - h^{\text{н}}_n)$ назначаются по соответствующим размерам заготовок
Расстояние до верхней кромки ската: на первой операции, $(h_{\text{мск}})_1$ на i–й, $(h_{\text{мск}})_i$ на последней, $(h_{\text{мск}})_n$	$\left(h_{\text{мск}}\right)_1 = \dfrac{\left(h^{\text{с}}_{\text{м}1} + h_{\text{ск}1}\right)}{1{,}01}$ $\left(h_{\text{мск}}\right)_i = \dfrac{\left(h^{\text{с}}_{\text{м}i} + h_{\text{ск}i}\right)}{1{,}008}$ $\left(h_{\text{мск}}\right)_n = \left(h^{\text{с}}_{\text{м}n} + h_{\text{ск}n}\right)0{,}998$	–
Углы конусности матрицы, $\alpha_{\text{м}i}, \beta_{\text{м}i}$	$\alpha_{\text{м}1} = \alpha_1, \alpha_{\text{м}i} = \alpha_i, \alpha_{\text{м}n} = \alpha_n$ $\beta_{\text{м}1} = \beta_1, \beta_{\text{м}i} = \beta_i, \beta_{\text{м}n} = \beta_n$	Назначаются по соответствующим углам конусности заготовки
Диаметр обжимного стержня, $d_{\text{об}i}$	$d_{\text{об}i} = d^{\text{в}}_{i\min} - 2S^{\text{в}}_i + K$ $K = 0{,}02...0{,}07$	Коэффициент K назначается по опытным данным

10.7.8. Расчет технологических усилий

Технологическое усилие обжима рассчитывается в зависимости от максимального меридионального напряжения (см. подразд. 10.3) на завершающей, седьмой, стадии процесса, от размеров заготовки в так называемом несущем сечении, на входе в матрицу ($R_{\text{вх}}$, $S_{\text{вх}}$) и от геометрии инструмента (углов конусности матриц α, β), радиусов сопряжения рабочих поверхностей деформируемой заготовки $R_{\rho 1}$, $R_{\rho 3}$, условий контактного трения f, величины степени деформации и некоторых других факторов. Расчет технологического усилия на любой операции обжима выполняется по формуле

$$P_i = 2\pi\left(R_i\right)_{\text{вх}}\left(S_i\right)_{\text{вх}}\sigma_{\rho i\max}\frac{1}{\cos\alpha_i}. \qquad (10.140)$$

При малых углах α_i можно принять $\cos\alpha_i \approx 1{,}0$. Принимаем

$$\left(R_i\right)_{\text{вх}} = \frac{d_i^{\text{н}} - S_i^{\text{н}}}{2}; \quad \left(S_i\right)_{\text{вх}} = S_i^{\text{н}}. \tag{10.141}$$

Максимальное меридиональное напряжение

$$\sigma_{\rho i\max} = -2b\sigma_{ii}\left(1 + f\operatorname{ctg}\alpha_i\right)\left(1 - \sqrt{\frac{\rho_{1i}}{\rho}}\right) + \sum_{i=2}^{k}\Delta\sigma_{\rho ij}\sqrt{\frac{\rho_{ij}}{\rho}}, \tag{10.142}$$

где ρ_{ij} – расстояние от оси матрицы до срединной поверхности заготовки на j-й стадии процесса; ρ – текущее значение расстояния от оси матрицы до срединной поверхности; ρ_{1i} – расстояние от оси матрицы до срединной поверхности заготовки на 1-й стадии процесса; $\Delta\sigma_{\rho j}$ – приращение меридионального напряжения на j-й стадии.

Расчетная схема представлена на рис. 10.43.

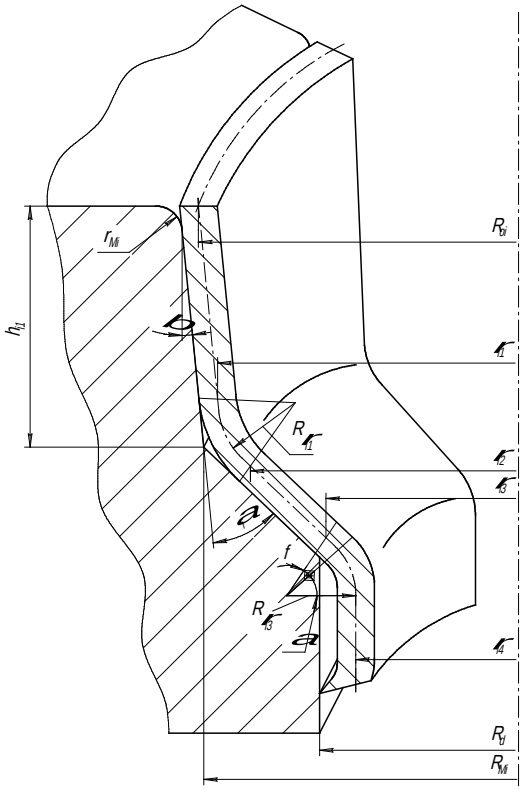


Рис. 10.43. Расчетная схема к определению усилия деформирования

Приращение напряжений (второй член уравнения (10.142)) определяется по следующим соотношениям:

$$\sum_{j=2}^{7}\Delta\sigma_{\rho ij}=-\frac{2b\sigma_{ij}\left[\sin\left(\alpha_i-\beta_i\right)\right]}{\sqrt{8\left(2\frac{R_{\text{м}i}}{S_i^C}-\cos\beta_i+\sin\beta_i\cdot\operatorname{tg}\frac{\alpha_i-\beta_i}{2}\right)}}+\sum_{j=4}^{7}\Delta\sigma_{\rho ij};\qquad(10.143)$$

$$\sum_{j=4}^{7}\Delta\sigma_{\rho ij}=-2b\sigma_{ij}\left(1+f\operatorname{ctg}\alpha\right)\left(1-\sqrt{\frac{\rho_{i3}}{\rho_{i2}}}\right)+\sum_{j=6,7}^{7}\Delta\sigma_{\rho ij}\sqrt{\frac{\rho_{i3}}{\rho_{i2}}};\qquad(10.144)$$

$$\sum_{j=6}^{7}\Delta\sigma_{\rho ij}=-\frac{b\sigma_{ij}S_i^{\text{в}}}{4}\left(\frac{1}{R_{\rho i_2}}+\frac{1}{R_{\rho i3}}\right),\qquad(10.145\text{а})$$

где

$$R_{\rho i2}=\sqrt{\frac{\rho_{i2}S_i^{\text{в}}}{8\alpha_i\sin\alpha_i}};\qquad(10.145\text{б})$$

$$R_{\rho i3}=\sqrt{\frac{S_i^{\text{в}}\left(\rho_{i3}-\rho_{i4}\right)}{4\left(\alpha_i\sin\alpha_i+\cos\alpha_i-1\right)}}.\qquad(10.145\text{в})$$

Интенсивность напряжений определяется для второй и последующих стадий ($j\geq 2$) по формуле

$$\sigma_{ij}=-\sqrt{3}\sigma_{\rho i(j-1)},\qquad(10.146)$$

где $\sigma_{\rho i(j-1)}$ – меридиональное напряжение на предшествующей стадии.

Для первой стадии процесса ($j = 1$) принимается

$$\sigma_{i1}=\sigma_{i0}=\sigma_{0,2}(\sigma_{\text{т}}),\qquad(10.147)$$

где $\sigma_{0,2}$ ($\sigma_{\text{т}}$) – условный (физический) предел текучести материала заготовки.

Алгоритм расчета.

1. Определение исходных данных: размеров заготовки до и после обжима на *i*-й операции (пп. 10.7.2, 10.7.4, 10.7.6), рабочего инструмента на *i*-й операции (п. 10.7.7), механических свойств материала исходной заготовки до обжима $\sigma_{\text{в}0}^{\text{в}},\sigma_{\text{в}0}^{\text{с}},\sigma_{0,2}^{\text{в}}(\sigma_{\text{т}}^{\text{в}}),\sigma_{0,2}^{\text{с}}(\sigma_{\text{т}}^{\text{с}})$, технологической схемы обжима, условий контактного трения.

2. Расчет максимального меридионального напряжения на первой стадии ($j = 1$):

$$\sigma_{\rho i1}=-2b\sigma_{i1}\left(1+f\operatorname{ctg}\alpha_i\right)\left(1-\sqrt{\frac{R_{0i}-h_{i1}\operatorname{tg}\beta_i}{R_{0i}}}\right),\qquad(10.148)$$

где $b = 2/\sqrt{3}$; $\sigma_{л1} = \sigma^{в}_{0,2}(\sigma^{в}_{т})$ – предел текучести материала заготовки в отожженном состоянии в верхнем расчетном сечении на первом обжиме (при применении перед обжимом отжига краевой части заготовки); $R_{0i} \approx \dfrac{d_i^{н} - S_i^{н}}{2}$; $h_{i1} = h_{мi} - r_{мi}$.

3. Расчет интенсивности напряженного состояния на второй стадии процесса ($j = 2$) по формуле (10.146):

$$\sigma_{i2} = -\sqrt{3}\sigma_{\rho i1}. \qquad (10.149)$$

4. Расчет максимального меридионального напряжения на второй стадии процесса:

$$\sigma_{\rho i2} = \sigma_{\rho i1} + \Delta\sigma_{\rho i2}\sqrt{\frac{\rho_{i2}}{\rho_{i1}}}, \qquad (10.150)$$

где $\sigma_{\rho i1}$ – по формуле (10.148);

$$\Delta\sigma_{\rho i2} = -\frac{2b\sigma_{i2}\left[\sin(\alpha_i - \beta_i)\right]}{\sqrt{8\left(2\dfrac{R_{мi}}{S_i^{в}} - \cos\beta_i + \sin\beta_i \cdot \operatorname{tg}\dfrac{\alpha_i - \beta_i}{2}\right)}}; \qquad (10.151)$$

$$\rho_{i2} = R_{мi} + b_i\cos\alpha_i; \qquad (10.152)$$

$$b_i = \left(R_{\rho i1} + \frac{S_i^{в}}{2}\right)\operatorname{tg}\frac{\alpha_i - \beta_i}{2}; \qquad (10.153)$$

$$R_{\rho 1} = \frac{S_i^{в}\sqrt{\dfrac{1}{2}\left(2\dfrac{R_{мi}}{S_i^{в}} - \cos\beta_i + \sin\beta_i \cdot \operatorname{tg}(\alpha_i - \beta_i)\right)}}{\sin(\alpha_i - \beta_i)}. \qquad (10.154)$$

5. На третьей стадии принимается

$$\Delta\sigma_{\rho i3} = 0,\ \sigma_{\rho i3} = \sigma_{\rho i2}. \qquad (10.155)$$

6. Расчет интенсивности напряжений на четвертой стадии процесса:

$$\sigma_{i4} = -\sqrt{3}\sigma_{\rho i2}. \qquad (10.156)$$

7. Расчет меридионального напряжения на четвертой стадии:

$$\sigma_{\rho i4} = -2b\sigma_{i4}\left(1+ f\mathrm{ctg}\alpha\right)\times$$

$$\times\left\{1-\left[\frac{R_{\text{м}i}-\sin\alpha_i\left(R_{\rho i1}+\frac{S_i^{\text{в}}}{2}\mathrm{tg}\frac{\alpha_i-\beta_i}{2}\right)-\frac{S_i^{\text{в}}}{2}\cos\alpha_i-h_{i2}\mathrm{tg}\alpha_i}{R_{\text{м}i}-\sin\alpha_i\left(R_{\rho i1}+\frac{S_i^{\text{в}}}{2}\mathrm{tg}\frac{\alpha_i-\beta_i}{2}\right)-\frac{S_i^{\text{в}}}{2}\cos\alpha_i}\right]^{\frac{1}{2}}\right\}, \quad (10.157)$$

где
$$h_{i2} = \left(\rho_{i2}-\rho_{i3}\right)\frac{1}{\mathrm{tg}\alpha_1}, \quad (10.158)$$

$$\rho_{i3} = \frac{d_i}{2}. \quad (10.159)$$

8. Расчет меридионального напряжения на пятой стадии:

$$\Delta\sigma_{\rho i5} = 0,\ \sigma_{\rho i5} = \sigma_{\rho i4}. \quad (10.160)$$

9. Расчет меридионального напряжения на седьмой стадии:

$$\sigma_{\rho i7} = \sigma_{i5} - \frac{b\sigma_{i4}S_i^{\text{в}}}{4}\left(\frac{1}{R_{\rho i2}}+\frac{1}{R_{\rho i3}}\right), \quad (10.161)$$

где

$$R_{\rho i2} = \left[\frac{\rho_{i2}S_i^{\text{в}}}{8\alpha_i\sin\alpha_i}\right]^{\frac{1}{2}}, \quad (10.162)$$

$$R_{\rho i3} = \left[\frac{S_i^{\text{в}}\left(\rho_{i3}+\rho_{i4}\right)}{4\left(\alpha_i\sin\alpha_i+\cos\alpha_i-1\right)}\right]^{\frac{1}{2}}, \quad (10.163)$$

$$\rho_{i4} = \left(\frac{d_i}{2}-\frac{S_i^{\text{в}}}{m_{i\Sigma}^{\text{в}}}\right). \quad (10.164)$$

10. Расчет максимального меридионального напряжения:

$$\sigma_{\rho i\Sigma} = \sigma_{\rho i7}\ . \quad (10.165)$$

11. Расчет технологических усилий по стадиям обжима:

$$P_{ij} = 2\pi R_{i\text{вх}}S_{i\text{вх}}.\sigma_{\rho ij}\frac{1}{\cos\alpha_i}. \quad (10.166)$$

12. Расчет максимального технологического усилия:

$$P_{i\max}=P_{i7}\ . \quad (10.167)$$

На рис. 10.44 дана общая блок-схема алгоритма проектирования технологического процесса обжима [9].

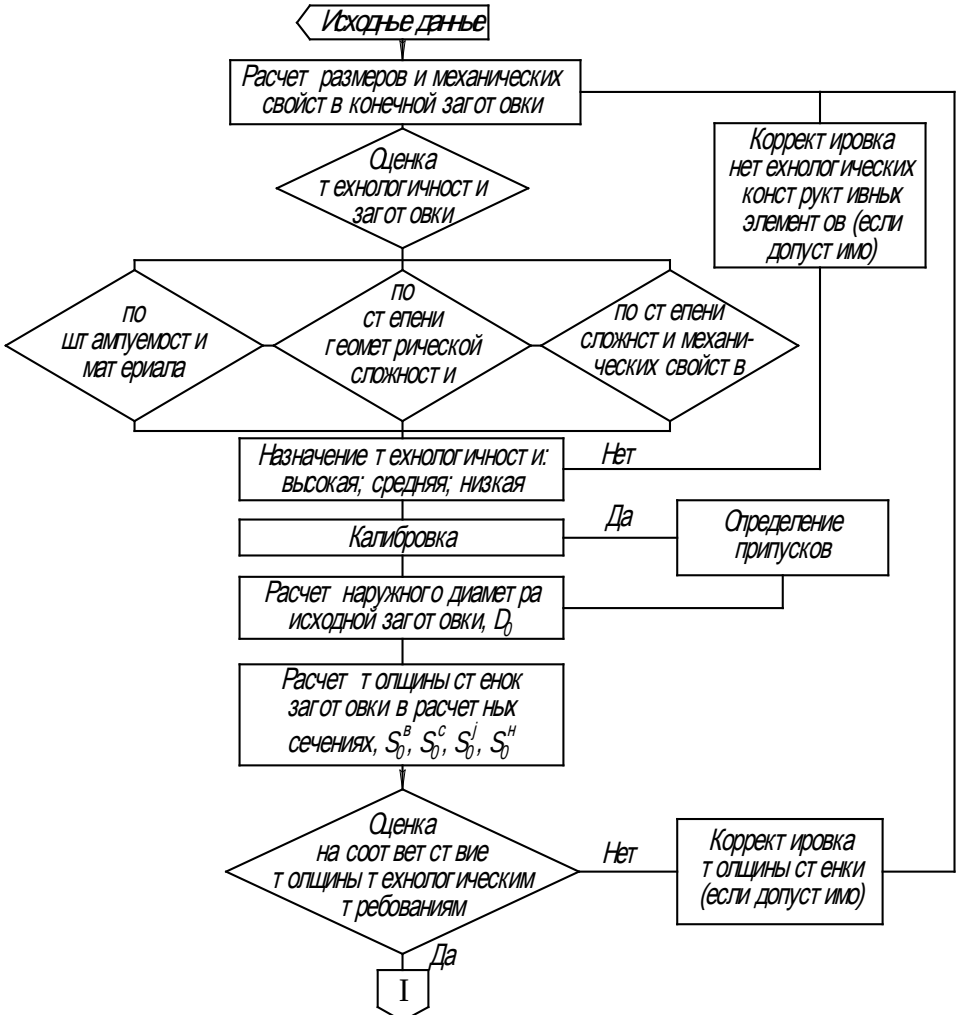


Рис. 10.44. Блок-схема алгоритма проектирования процесса обжима

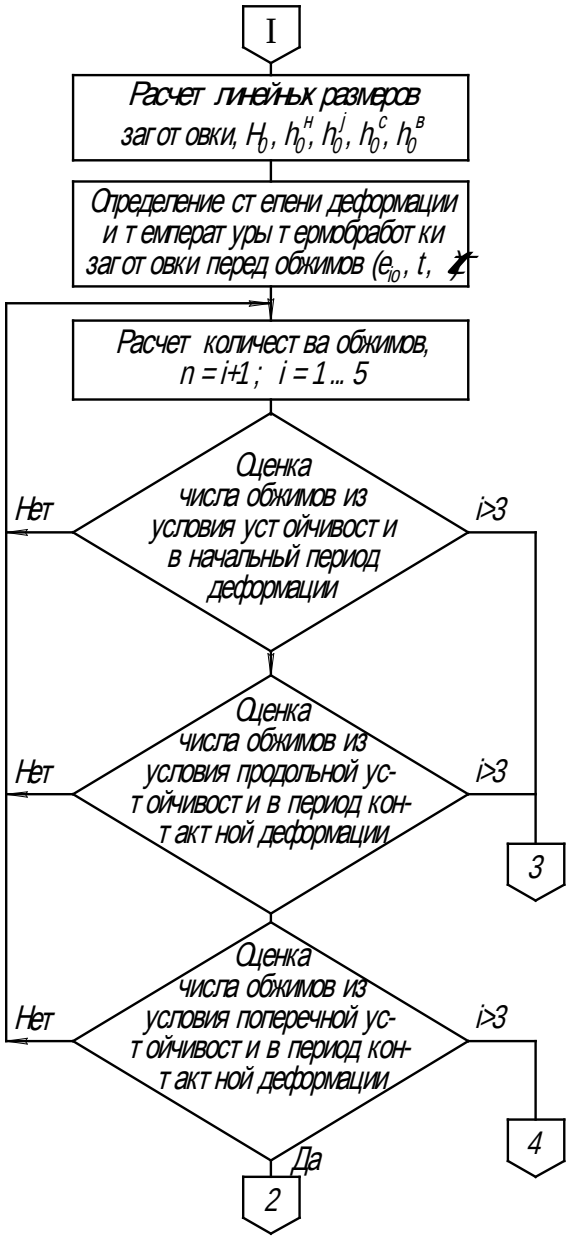


Рис. 10.44 (продолжение)

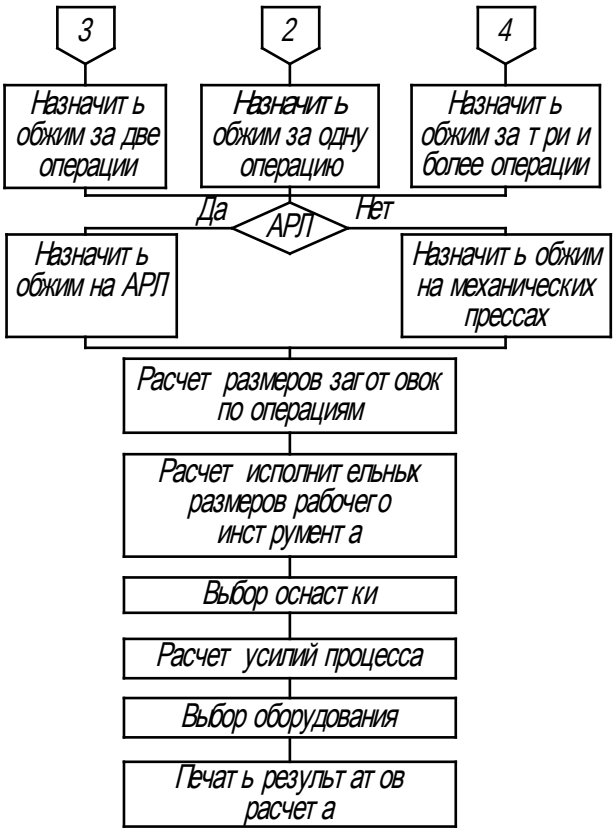


Рис. 10.44 (окончание)

10.8. Пример расчета технологических параметров процесса обжима

10.8.1. Исходные данные

Исходными данными для расчета служат чертеж готовой детали, принятый маршрутный технологический процесс изготовления детали, рекомендуемые припуски под обрезку, технические требования. За конечную штампованную заготовку принимаем заготовку после последнего обжима, т.е. без экстракторной канавки и фланца.

На основе анализа чертежа за расчетные сечения принимаем сечения сопряжения конструктивных элементов детали и те сечения, в которых заданы требования по механическим свойствам (рис. 10.45).

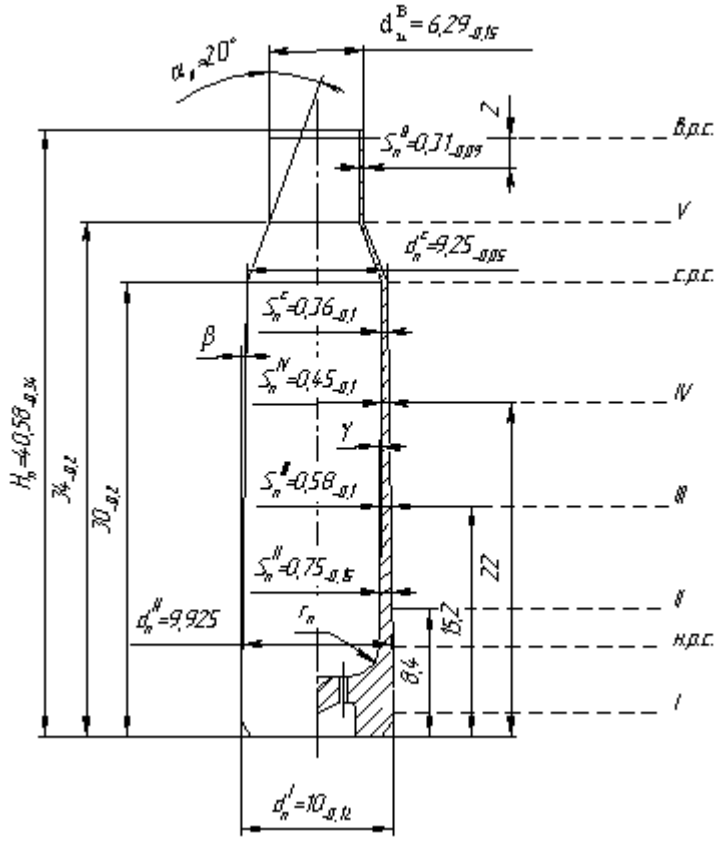


Рис. 10.45. Эскиз конечной заготовки для обжима

Тогда все размеры, за исключением высоты, конечной штампованной заготовки (рис. 10.45) принимаем равными соответствующим размерам готовой детали:

$d_n^{в} = d^{в} = 6{,}29$ мм; $S_n^{в} = S^{в} * C_S^{в} = 0{,}31$ мм; $h_n^{в} = h^{в} = 35{,}18$ мм;

$d_n^{с} = d^{с} = 9{,}25$ мм; $S_n^{с} = S^{с} = 0{,}36$ мм; $h_n^{с} = h^{с} = 25{,}6$ мм;

$d_n^{н} = d^{н} = 9{,}925$ мм; $S_n^{н} = S^{н} = 0{,}845$ мм; $h_n^{н} = \gamma_n(1-\sin\gamma) \cong 2{,}0$ мм;

$d_n^{I} = d^{I} = 10{,}0$ мм;

$d_n^{II} = d^{II} = 9{,}855$ мм; $S_n^{II} = S^{II} = 0{,}75$ мм; $h_n^{II} = h^{II} = 4{,}0$ мм;

$d_n^{III} = d^{III} = 9{,}665$ мм; $S_n^{III} = S^{III} = 0{,}58$ мм; $h_n^{III} = h^{III} = 10{,}8$ мм;

$d_n^{IV} = d^{IV} = 9{,}475$ мм; $S_n^{IV} = S^{IV} = 0{,}45$ мм; $h_n^{IV} = h^{IV} = 17{,}6$ мм;

$d_n^{V} = d^{V} = 6{,}29$ мм; $S_n^{V} = S^{V} = 0{,}31$ мм; $h_n^{V} = h^{V} = 29{,}6$ мм;

$H_п$=H +ΔH= 40,58 мм; $h_{дп}$ = $h_д$+ΔH= 6,58 мм; $\beta_п$ = β = 1°; $\alpha_п$ = α = 20°;

$\gamma_п$ = γ =1°; $r_п$ = r = 2 мм, где Δ H = 1,0 – припуск на обрезку дульца; $C_S^в$ = 1,0 (при отсутствии дополнительной операции по калибровке дульца).

Так как при обжиме дно не должно подвергаться пластической деформации, то размеры капсюльного гнезда в дне конечной штампованной заготовки назначаем равными соответствующим размерам готовой детали.

Согласно технологическому маршруту изготовления детали рекристаллизационный отжиг проводится перед обжимом, отжигов промежуточных и после второго обжима нет, следовательно, значения характеристик механических свойств конечной штампованной заготовки назначаются равными соответствующим значениям характеристик механических свойств готовой детали в каждом расчетном сечении j, т.е.:

$M_п^j = M^j$; j = 1,2,… k, где k – количество расчётных сечений.

10.8.2. Оценка технологичности конструкции конечной заготовки при обжиме

К исходным данным относятся эскиз конечной заготовки (рис. 10.45), вид основного способа формообразования и свойства материала детали (табл. 10.10).

Таблица 10.10

Твердость в расчетных сечениях заготовки после обжима

№ пояса	I	II	III	IV	V	VI
Твердость по Виккерсу	На фланце	На расстоянии от фланца, мм			На скате	На середине дульца
		8,0-9,0	14,7-15,7	21,5-22,5		
max $HV_э$	200	230	245	260	260	225
min $HV_э$	175	195	210	220	205	175

Марка материала – сталь 18ЮА (ГОСТ 803 – 81). Химический состав представлен в табл. 10.11, механические свойства – в табл. 10.12, свойства штампуемости материала – в табл. 10.13.

Таблица 10.11

Химический состав стали 18ЮА

C, %	Mn, %	Al, %	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
			не более, %					
0,16 – 0,22	0,20 – 0,40	0,02 – 0,07	0,13	0,025	0,025	0,15	0,25	0,20

Таблица 10.12

Механические свойства стали 18ЮА в отоженном состоянии

$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_у$, МПа	ε_{iy}	ε_{ip}	ψ_y	$\psi_р$
225	353	458	0,30	1,59	0,26	0,80

Таблица 10.13

Свойства штампуемости материала

Характеристика	Оценка свойств
Обрабатываемость давлением	Хорошая: $\sigma_{0,2} / \sigma_в = 0,5 – 0,65$; $\psi_р = 0,8$; $\delta \geq 27\%$

Характеристика формы детали:

а) деталь полая, высокая, осесимметричная, с дном;

б) общее количество конструктивных элементов в детали $N_э = 9$, участки сопряжения не выделяют в виде конструктивных элементов.

Основные требования, предъявляемые к детали:

а) отсутствие царапин, рисок, заусенцев, вмятин и других дефектов;

б) деталь должна быть жесткой, прочной, не допускать потери устойчивости;

в) гильза – сопрягаемая деталь, поэтому необходимо точное выполнение размеров по чертежу;

г) точность размеров – не ниже 12-го квалитета;

д) шероховатость поверхностей – не ниже $R_a = 3,2$ мкм;

е) заданы требования по твердости материала.

Основные способы формообразования – вырубка, вытяжка с утонением, штамповка дна, обжим; вид исходной заготовки – кружок; способ изготовления исходной заготовки: вырубка из полосы.

Контрольные уровни показателей технологичности назначены в зависимости от рассматриваемого в данной методике способа штамповки – обжима, по табл. 10.14.

Таблица 10.14

Оценка уровней ТКИ заготовки, изготавливаемой обжимом

№пп группы показателей ТКИ	Наименование группы показателей ТКИ	Вид показателя ТКИ	Контрольные уровни ТКИ			Уровень ТКИ заготовки (рис. 10.45)
			Высокий	Средний	Низкий	
1	2	3	4	5	6	7
1	Расход материала	Коэффициент использования металла η, %	Более 95	95…90	Менее 90	ВТ
2	Штампуемость материала	2.1. Сопротивление материала деформированию – предел текучести, $\sigma_{0,2}(\sigma_Т)$МПа	Менее 260	260…520	Более 520	ВТ

Продолжение табл. 10.14

1	2	3	4	5	6	7
2	Штампуемость материала	2.2. Способность к деформационному упрочнению: $-n \cong \varepsilon_{iy}$	Более 0,25	0,25…0,15	Менее 0,15	ВТ
		$-\sigma_{0,2}/\sigma_{в}$	Менее 0,60	0,60…0,75	Более 0,75	СТ
3	Сложность геометрической формы	3.1. Общая форма детали	Осесимметричная, ступенчатая, без дна	Осесимметричная, ступенчатая, с дном	Неосесимметричная	СТ
		3.2. Общее количество конструктивных элементов в детали $N_э$	1	1…10	Более 10	СТ
		3.3. Относительное количество нетехнологичных для обжима конструктивных элементов в детали	Менее 0,25	0,25…0,50	Более 0,50	СТ
		3.4. Минимальная относительная толщина стенки обжимаемого участка детали, $(S_{\min}/d_n^{в})\cdot 100$	Более 2,7	2,7…0,9	Менее 0,9	ВТ
		3.5. Перепад диаметров $d_{\min}/d_{\max}$	Более 0,80	0,80…0,65	Менее 0,65	НТ
		3.6. Допускаемые отклонения на минимальную толщину стенки (на разностенность), δ_S %	До 10	10…30	Более 30	НТ
		3.7. Односторонний угол конусности, α, град	Менее 2,0	2…10	Более 10	ВТ
		3.8. Относительная высота *H/d*	Менее 100	100…500	Более 500	СТ
		3.9. Габаритные размеры *H*, *D*, мм	Менее 17	17…21	Более 21	ВТ
		3.10. Перепад толщин стенки от среза дульца $S^{в}/S^{н}$	Менее 1,0	1,0…1,10	Более 1,10	ВТ

Окончание табл. 10.14

1	2	3	4	5	6	7
4	Степень сложности требований по механическим свойствам материала детали	4.1. Степень упрочнения, $\sigma_в / \sigma_{в0}$ или HV / HV_0	Менее 1,5	1,5…2,0	Более 2,0	СТ
		4.2. Степень неравномерности распределения механических свойств в продольном направлении $(\sigma_в)_{обж} / \sigma_в$ $(HV_{обж} / HV)$	Менее 1,0	1,0…1,10	Более 1,10	ВТ

Низкая технологичность по перепаду диаметров и допустимой разностенности влияет на качество операции обжима и трудоемкость изготовления. Однако диаметры конечной заготовки и готовой детали регламентированы соответствующими стандартами на патроны и оружие и не могут быть изменены без соответствующих решений разработчиков конструкторской документации.

10.8.3. Расчет размеров исходной заготовки

Исходными данными для этого этапа расчета служат размеры конечной штампованной заготовки.

Расчетные размеры заготовки (рис. 10.37):

- наружный диаметр D_0;
- толщины стенок в расчетных сечениях $S_0^в$, $S_0^с$, … , S_0^j, … , $S_0^н$;
- толщина дна $S_0^д$;
- расстояния расчетных сечений от установочной технологической базы (внутренней поверхности дна) $h_0^в$, $h_0^с$,…, h_0^j,…, $h_0^н$;
- радиусы сопряжения внутренних поверхностей стенки и дна r_0, R_0;
- полная высота H_0.

Последовательность расчета и расчетные формулы приведены в п. 10.7.4.

Наружный диаметр заготовки

$D_0 = d_n^н + 2(h_n^н + S_n^д)\text{tg}\beta = 9{,}925 + 2(1{,}9 + 4{,}4)\text{tg}1° = 10{,}0$ мм.

Толщина стенки заготовки в в.р.с.

$S_0^в = C_1^в C_2^в S_n^в = 0{,}95 \cdot 0{,}793 \cdot 0{,}31 = 0{,}23$ мм, где $C_1^В = 0{,}95$; $C_2^в = \sqrt{m_\Sigma^в}$;

$m_\Sigma^в = 6{,}29/10 = 0{,}629$.

Толщина стенки заготовки в с.р.с.

$$S_0^c = S_2^c S_n^c = \frac{m_\Sigma^c + \sqrt{m_\Sigma^c}}{2} S_n^c = \frac{0,925 + 0,962}{2} * 0,36 = 0,34 \text{ мм};$$

$$m_\Sigma^6 = \frac{9,25}{10} = 0,925.$$

Толщина стенки заготовки в н.р.с.

$$S_0^н = C_2^н S_n^н = m_\Sigma^н S_n^н = 0,9925 \cdot 0,845 = 0,84 \text{ мм}.$$

Допуск на толщину стенки исходной заготовки в верхнем расчетном сечении принимаем равным этому допуску для конечной заготовки, т.е. $S_0^н = 0,09$ мм.

Толщины стенки заготовки в промежуточных расчетных сечениях j:

$$S_0^j = S_2^j S_n^j = \frac{m_\Sigma^j + \sqrt{m_\Sigma^j}}{2} S_n^j;$$

$$S_0^{II} = \frac{0,9855 + 0,9927}{2} \cdot 0,75 = 0,74 \text{ мм};$$

$$m_\Sigma^{II} = \frac{9,855}{10} = 0,9855;$$

$$S_0^{III} = \frac{0,9655 + 0,9831}{2} \cdot 0,58 = 0,565 \text{ мм};$$

$$m_\Sigma^{III} = \frac{9,655}{10} = 0,9655;$$

$$S_0^{IV} = \frac{0,9475 + 0,9734}{2} \cdot 0,45 = 0,43 \text{ мм};$$

$$m_\Sigma^{IV} = \frac{9,475}{10} = 0,9475;$$

$$S_0^V = \frac{0,629 + 0,7931}{2} \cdot 0,31 = 0,23 \text{ мм};$$

$$m_\Sigma^V = \frac{6,29}{10} = 0,629.$$

Толщина дна: $S_0^д = S^д = 4,4$ мм, т.к. ниже н.р.с. размеры при обжиме не меняются.

Высота заготовки при обжиме приближенно определяется по формуле

$$H_0 \cong h_n^н + S_n^д + 1,05 \left[\frac{\left(d_{nср}^н\right)^2 - \left(d_{nср}^с\right)^2}{4 \sin\beta_0 \sqrt{d_{nср}^н d_{nср}^с}} + \frac{h_n^д d_{nср}^в + \frac{\left(d_{nср}^н\right)^2 - \left(d_{nср}^с\right)^2}{4 \sin\alpha}}{\sqrt{d_{nср}^с d_{nср}^в}} \right],$$

где $S_{n\text{ср}} = \dfrac{S_n^{\text{с}} + S_n^{\text{н}}}{2}$; $S_{n\text{ср}}^{\text{в}} = \dfrac{S_n^{\text{с}} + S_n^{\text{в}}}{2}$; $d_{n\text{ср}}^{\text{н}} = d_n - S_{n\text{ср}}$; $d_{n\text{ср}}^{\text{с}} = d_n^{\text{с}} - S_{n\text{ср}}$;

$d_{n\text{ср}}^{\text{в}} = d_n^{\text{в}} - S_{n\text{ср}}^{\text{в}}$; $\beta_0 = \beta_n$.

$$S_{n\text{ср}} = \frac{0{,}36 + 0{,}845}{2} = 0{,}6025 \text{ мм};$$

$$d_{n\text{ср}}{}^{\text{н}} = 9{,}925 - 0{,}6025 = 9{,}3225 \text{ мм};$$

$$d_{n\text{ср}}{}^{\text{с}} = 9{,}25 - 0{,}6025 = 8{,}6475 \text{ мм};$$

$$S_{n\text{ср}}{}^{\text{в}} = \frac{0{,}36 + 0{,}31}{2} = 0{,}335 \text{ мм};$$

$$d_{n\text{ср}}{}^{\text{в}} = 6{,}29 - 0{,}335 = 5{,}955 \text{ мм};$$

$$H_0 = 4{,}4 + 1{,}05 \times$$

$$\times \left(\frac{9{,}3225^2 - 8{,}6475^2}{4 \cdot \sin 1^\circ \sqrt{9{,}3225 \cdot 8{,}6475}} + \frac{6{,}58 \cdot 5{,}955 + \dfrac{8{,}6475^2 - 5{,}955^2}{4 \cdot \sin 20^\circ}}{\sqrt{8{,}6475 \cdot 5{,}955}} \right) \cong 41 \text{ мм}.$$

Расстояния расчетных сечений от установочной технологической базы (внутренней поверхности дна) $h_0^{\text{в}}$, $h_0^{\text{с}}$,…, h_0^{j},…, $h_0^{\text{н}}$ определяется из условия равенства объемов конечной и исходной заготовок, заключенных между одинаковыми расчетными сечениями:

$$h_0^{\text{н}} = h_n^{\text{н}} = r_n(1 - \sin\beta) = 2(1 - \sin 1^\circ) \cong 1{,}9 \text{ мм};$$

$$h_n^{\text{с}} = h_n^{\text{н}} + 1{,}05 \left[\frac{\left(d_{n\text{ср}}^{\text{н}}\right)^2 - \left(d_{n\text{ср}}^{\text{с}}\right)^2}{4 \sin\beta \sqrt{d_{n\text{ср}}^{\text{н}} d_{n\text{ср}}^{\text{в}}}} \right] = 2{,}0 + 1{,}05 \left[\frac{(9{,}33)^2 - (8{,}65)^2}{4 \sin 1^\circ \sqrt{9{,}33 \cdot 8{,}65}} \right] = 25{,}75 \text{ мм};$$

$$h_0 \cong H_0 - S_n^{\text{д}} = 34{,}50 \text{ мм}.$$

Координаты промежуточных сечений h_0^{II}, h_0^{III},..., h_0^{V} (см. рис. 10.37) могут быть определены по аналогии из условия равенства соответствующих объемов конечной и исходной заготовок.

Более точный расчет координат расчетных сечений может быть выполнен с использованием компьютерных программ.

10.8.4. Расчет количества операций обжима

Расчет количества операций проводится из условий обеспечения устойчивости заготовки трех видов при обжиме (см. п. 10.7.5):

1) поперечной в начальный период неконтактной деформации;

2) продольной в период контактной деформации;

3) поперечной в период контактной деформации.

Исходные данные:

- минимальная толщина стенки исходной заготовки, в верхнем расчетном сечении, $S_0^{\text{в}}$;
- допускаемое отклонение на толщину стенки (разностенность) заготовки в верхнем расчетном сечении ($\Delta S^{\text{в}} = S^{\text{в}}_{\max} - S^{\text{в}}_{\min}$);
- углы конусности α_n, β_n, штампуемой конечной заготовки;
- наружный диаметр дульца $d_n^{\text{в}}$ (в верхнем расчетном сечении);
- механические свойства материала исходной заготовки в расчетных сечениях ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_{\text{В}}$, HV, $\psi_{\text{у}}$);
- способ обжима и технологическая схема;
- справочные данные по предельным $m_{\text{пр}}$ и допустимым $m_{\text{доп}}$ коэффициентам обжима и математические модели предельной до потери устойчивости пластической деформации $e_{i\text{y}}$ при обжиме.

Расчет количества операций из условия обеспечения устойчивости деформируемой заготовки в начальный период неконтактной деформации.

Расчет выполняется путем последовательной оценки технологических возможностей штамповки конечной заготовки за одну (n = 1) или большее число операций обжима (n > 1,0). Оценка выполняется при принятии n = 1 по условию:

$$\frac{S_0^{\text{в}}}{D_0} \ge \left[\frac{S}{D}\right] = \frac{K_{\text{уст.}} K_{\text{н}}^{\text{в}}}{(1 - 0{,}5\delta_s^{\text{в}})} \left[0{,}125\ \text{tg}(\alpha_n - \beta_n) + \frac{\text{tg}\left(\frac{\alpha_n - \beta_n}{2}\right)}{6\cos(\alpha_n - \beta_n)} \right]^2 ,$$

где $\frac{S_0^{\text{в}}}{D_0} = \frac{0{,}23}{10} = 0{,}023$ – относительная толщина исходной заготовки в верхнем расчетном сечении; $\left[\frac{S}{D}\right]$ – допустимое значение относительной толщины стенки; $K_{\text{уст.}} = 2$ – коэффициент запаса устойчивости;

$\delta_S^{\text{в}} = \dfrac{S_{\max}^{\text{в}} - S_{\min}^{\text{в}}}{S_{\text{ср}}^{\text{в}}} = \dfrac{0{,}23 - (0{,}23 - 0{,}09)}{(0{,}23 + (0{,}23 - 0{,}09))/2} = \dfrac{0{,}09 \cdot 2}{0{,}37} = 0{,}49$ – относительная разностенность исходной заготовки в верхнем расчетном сечении; $K_{\text{н}}^{\text{в}} = f\left(\delta_S^{\text{в}}\right) = 1{,}25$ – коэффициент неравномерности пластической деформации по периметру штампуемой заготовки в ее верхнем расчетном сечении; $\alpha_n = 20°$, $\beta_n = 1°$ – углы конусности ската и корпуса конечной заготовки соответственно.

После подстановки числовых значений параметров в первое условие устойчивости заготовки получили:

$$0{,}023 > \frac{2 \cdot 1{,}25}{(1 - 0{,}5 \cdot 0{,}49)} \left[0{,}125 \operatorname{tg}(20^\circ - 1^\circ) + \frac{\operatorname{tg}\left(\dfrac{20^\circ - 1^\circ}{2}\right)}{6 \cos(20^\circ - 1^\circ)} \right] = 0{,}005 .$$

Следовательно, при обжиме за одну операцию ($n = 1$) устойчивость первого вида заготовки обеспечивается и исключается образование продольных складок на кромке.

Расчет количества операций из условия продольной устойчивости заготовки в период контактной деформации. По аналогии с предыдущим расчетом рассматривается первоначально возможность обжима за одну операцию ($n = 1$).

Условие продольной устойчивости заготовки перед входом в нижнюю матрицу с углом конусности $\alpha_m = \alpha_n$ будет иметь следующий вид:

$$m_1 = m_{\Sigma}^{\text{в}} \geq m_{1\text{доп}},$$

где $m_{\Sigma}^{\text{в}} = \dfrac{d_n^{\text{в}}}{D_0} = \dfrac{6{,}29}{10{,}0} \cong 0{,}6$ – итоговый коэффициент обжима;

$m_{\text{доп}} = 2(1 - \psi_y) - \left[\left(1 - \psi_y\right)^2 + \dfrac{1{,}6\sigma_{\text{кр}} \cos\alpha_n - K(1 - \psi_{\text{y}})^2}{\sigma_{\text{в}}^{\text{c}}(1 + f\operatorname{ctg}\alpha_n)(3 - 2\cos\alpha_n)} \right]^{\frac{1}{2}}$, $\psi_y = 0{,}26$ – относительное равномерное сужение материала заготовки в отожженном состоянии, определяемое при испытании материала на растяжение; $\sigma_{\text{кр}} = \dfrac{\sigma_{0,2}^{\text{c}} + \sigma_{\text{в}}^{\text{c}}}{2} = \dfrac{225 + 353}{2} = 289$ МПа – критическое напряжение; $\sigma_{0,2}^{\text{c}} + \sigma_{\text{в}}^{\text{c}}$, – предел текучести (условный) и временное сопротивление материала заготовки соответственно в среднем расчетном сечении;

$$K = 1{,}5\frac{\sigma_{\text{в}}^{\text{с}}}{(1-\psi_y)^2}(1{,}35-2\psi_y)\sqrt{\frac{S_0^{\text{в}}}{D_0}}\sin\alpha_n =$$

$$= 1{,}5\frac{35{,}3}{(1-0{,}26)^2}(1{,}35-2\cdot 0{,}26)\sqrt{0{,}026}\sin 20^\circ = 1{,}03.$$

С учетом числовых значений параметров получим $m_1^{\text{в}} = 0{,}629 > m_{\text{доп}} = 0{,}44$.

Условие продольной устойчивости в период контактной деформации за одну операцию обеспечивается.

Расчет количества операций обжима из условия обеспечения поперечной устойчивости пластического деформирования в период контактной деформации. Проверяется возможность обжима за одну операцию (n = 1) по условию

$e_{i1}^{\text{в}} = e_{i\Sigma}^{\text{в}} \le (e_i^{\text{в}})_{\text{доп}}$, где $e_{i\Sigma}^{\text{в}} = \ln\frac{1}{m_\Sigma^{\text{в}}} = \ln\frac{1}{0{,}629} = 0{,}464$ – требуемая для получения заданного диаметра конечной заготовки степень деформации в верхнем расчетном сечении (диаметра дульца) $d_n^{\text{в}}$ (рис. 10.45);

$$(e_i^{\text{в}})_{\text{доп}} = K_{ei}e_{i\text{y}}^{\text{-в}}(1-3\upsilon_{ei}) = 1{,}4(1-3\cdot 0{,}02)e_{i\text{y}}^{\text{-в}} = 1{,}316e_{i\text{y}}^{\text{-в}}$$

– допустимая за один обжим степень деформации; K_{ei} – коэффициент, учитывающий влияние обжимного стержня, создающего подпор по внутренней поверхности заготовки; $\overline{e}_{i\text{y}}^{\text{-â}}$ – опытное, среднее выборочное значение предельной до потери устойчивости пластической деформации, определяемое по математической модели (см. формулу (10.47))(табл. 10.4 без учета разностенности исходной заготовки); υ_e – коэффициент вариации.

Расчет $\overline{e}_{i\text{y}}^{\text{-â}}$ выполняется по модели (10.47) при принятии следующих численных значений параметров модели: $e_{i0}^{\text{в}} = 0$; $\overline{T} = 8{,}6$; $\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} = 0{,}15$; $S_0 = 0{,}23$ мм;

$$\overline{e}_{i\text{y}}^{\text{-в}} \cong 0{,}074 + 0{,}51S_0 - 0{,}05\overline{T} - 0{,}15\ \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} + 0{,}01S_0\cdot\overline{T} + 0{,}03S_0\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} +$$

$$+ 0{,}03\overline{T}\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} - 0{,}147S_0^2 + 0{,}00454\overline{T}^2 - 0{,}0276\left(\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}\right)^2 =$$

$$= 0{,}074 + 0{,}51\cdot 0{,}23 - 0{,}05\cdot 8{,}6 - 0{,}15\cdot 0{,}15 + 0{,}011\cdot 0{,}23\cdot 8{,}6 +$$

$$+ 0{,}03\cdot 0{,}23\cdot 0{,}15 + 0{,}03\cdot 8{,}6\cdot 0{,}15 - 0{,}147\cdot 0{,}23\cdot 0{,}23 +$$

$$+ 0{,}00454\cdot 8{,}6\cdot 8{,}6 - 0{,}0276\cdot 0{,}15\cdot 0{,}15 \cong 0{,}18.$$

Условие устойчивости этого вида при обжиме за одну операцию не выполняется, так как $e_{i1}^{\text{в}} = e_{i\Sigma}^{\text{в}} = 0{,}464 > (e_i^{\text{в}})_{\text{доп}} = 1{,}316 e_{i\text{y}}^{\text{-в}} \cong 0{,}24$.

Обжим в этом случае будет сопровождаться образованием продольных складок (гофр).

Рассматривается возможность обжима за две операции ($n = 2$).

Для оценки возможности применения двухпереходного процесса обжима без промежуточного отжига выразим условие устойчивости пластического деформирования через коэффициент использования ресурса пластичности по аналогии с процессом вытяжки с утонением (см. формулу (8.97)):

$$\left[\left(\frac{e_{i1}^{\text{в}}}{e_{i\text{p}}(K)}\right)^{\frac{a_1}{a_2}} + \frac{e_{i2}^{\text{в}}}{e_{i\text{p}}(K)}\right]^{a_2} \le [\omega_i] = \frac{\omega_{i\text{y}}}{K_\omega},$$

где $e_{i1}^{\text{в}} = 1{,}316 e_{i\text{y}}^{\text{-в}} \cong 0{,}24$ – степень деформации на первом переходе в зоне возможного очага потери устойчивости; $e_{i\text{p}}(K) = \frac{2}{\sqrt{3}}$ – предельная до разрушения степень деформации в зоне сдвига; $K = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i} = 0$ – коэффициент жесткости схемы напряженного состояния при сдвиге в зоне локализации пластической деформации; $e_{i2}^{\text{в}} = e_{i\Sigma}^{\text{в}} - e_{i1}^{\text{в}} = 0{,}46 - 0{,}24 = 0{,}22$ – степень деформации на втором переходе в зоне возможного очага потери устойчивости; $a_1 = a_0^{1+0{,}14K_1} = (2{,}8)^{1+0{,}14\cdot 1{,}2} = 2{,}8^{0{,}8} = 2{,}35$; $a_0 = 2{,}8$ – характеристика механических свойств материала (стали содержанием углерода $\sim 0{,}2$ %); $K_1 = -1{,}2$ – показатель жесткости схемы напряженного состояния в зоне очага пластической деформации на первом обжиме, влияющий на интенсивность накопления поврежденность металла на первом переходе обжима; $a_2 = a_0^{1+0{,}14K_2} = (2{,}8)^{1-0{,}14\cdot 1{,}5} = 2{,}8^{0{,}79} = 2{,}26$; $K_2 = -1{,}5$ – коэффициент жесткости схемы напряженного состояния в зоне ОПД на втором обжиме; $[\omega_i]$ – допустимое значение коэффициента использования ресурса пластичности; $\omega_{i\text{y}} = 0{,}25$ – предельное до потери устойчивости и локализации деформации значение коэффициента использования ресурса пластичности; $K_\omega = 1{,}5$ – коэффициент запаса ресурса устойчивости.

В результате расчета получили

$$0{,}12 < [\omega_i] = 0{,}17.$$

Условие обжима за два перехода удовлетворено.

Определяем коэффициенты обжима из соотношения:

$$e_{i1}^{\text{в}} = b \ln \frac{1}{m_1^{\text{в}}};\ \ e_{i2}^{\text{в}} = e_{i\Sigma}^{\text{в}} - e_{i1}^{\text{в}} = b \ln \frac{1}{m_2^{\text{в}}},$$

откуда

$$m_1^{\text{в}} = \exp(-e_{i1}^{\text{в}}) = \exp(-0{,}24) \cong 0{,}785;$$

$$m_2^{\text{в}} = \exp(-e_{i2}^{\text{в}}) = \exp(-0{,}22) \cong 0{,}80.$$

Проверка:

$$m_\Sigma^{\text{в}} = m_1^{\text{в}} m_2^{\text{в}} = 0{,}785 \cdot 0{,}800 \cong 0{,}63.$$

По результатам оценки количества операций (переходов) из трех условий устойчивости принимаем наибольшее число, т.е. $n = 2$.

10.8.5. Расчет размеров заготовки после первого обжима

Исходные данные:

- размеры исходной заготовки (см. п. 10.8.3);
- количество операций $n = 2$;
- коэффициенты обжима в верхнем расчетном сечении: $m_1 = 0{,}785$; $m_2 = 0{,}80$.

Коэффициенты обжима по операциям для заданных расчетных сечений приведены в табл. 10.15.

Т а б л и ц а 10.15

Коэффициенты обжима по операциям

Расчетное сечение	Коэффициенты обжима		
	На первой операции m_1	На второй операции m_2	Суммарный m_Σ
в.р.с.	0,785	0,80	0,629
V р.с.	0,785	0,80	0,629
с.р.с.	0,94	0,98	0,925
IV р.с.	0,96	0,99	0,9475
III р.с.	0,975	0,99	0,9665
II р.с.	0,9855	0,99	0,995

Углы конусности обжатых заготовок: $\alpha_1 = 15°$; $\alpha_2 = 20°$; $\beta_1 = 0{,}45'$; $\beta_2 = 1°$.

Последовательность расчета размеров заготовок по операциям и расчетные формулы приведены в табл. 10.8, результаты расчета – в табл. 10.16...10.18.

Расстояния между расчетными сечениями заготовки после первого обжима и высоты ее элементов, заключенных между расчетными сечениями,

определяются из условия равенства объемов этих элементов объемам соответствующих элементов конечной заготовки (рис. 10.45).

Таблица 10.16

Расчет размеров обжатых на промежуточных операциях заготовок

Определяемая величина	Расчет
Наружный диаметр заготовки в в.р.с.: на первой операции на второй операции	 $d_1^{в}$ = 0,785*10 =7,85 мм $d_2^{в}$ = 6,29 мм
Наружный диаметр заготовки в с.р.с.	$d_1^{с}$ = 0,94*10 = 9,4 мм $d_2^{с}$ = 9,25 мм
Наружный диаметр заготовки в других расчетных сечениях	d_1^{5} = 7,6 мм, d_2^{5} = 6,39 мм; d_1^{4} = 9,65 мм, d_2^{4} = 9,475 мм; d_1^{3} = 9,75 мм, d_2^{3} = 9,665 мм; d_1^{2} = 9,9 мм, d_2^{2} = 9,855 мм; d_1^{1} = 10 мм, d_2^{1} = 10 мм
Наружный диаметр заготовки в н.р.с.	$d_н^{с}$ = 10 мм
Расстояние н.р.с. от внутренней поверхности дна	$h_1^{н}$ = $_2^{н}$ = 2мм
Угол конусности корпусной части заготовки	β_1 =0,45’; β_2 = 1°
Угол конусности заготовки в зоне ската	α_1 = 15°; α_2 =20°
Толщина торцевой кромки дульца после обжима	$S_1^{кр}$ = 0,23/√0,785 = 0,26 мм; $S_2^{кр}$ = 0,29 мм
Максимальная толщина стенки дульца после обжима	$S_{max1}^{в}$ = 0,23/0,785 = 0,29 мм; $S_{max2}^{в}$ = 0,36 мм
Толщина стенки дульца после калибровки на первой операции	$S_1^{д}$ = 0,98*0,29 = 0,28 мм; $S_2^{д}$ = 0,31 мм
Коэффициент утонения на первой операции	$C_{31}^{в}$ = 0,98; $C_{32}^{в}$ = 0,9
Толщина стенки в с.р.с.	$S_1^{с}$ = 0,34/0,5*(0,94+√0,94) = 0,35 мм; $S_2^{с}$ = 0,36 мм
Толщина стенки в н.р.с.	$S_1^{н}$ = $_2^{н}$ = 0,845 мм
Высота заготовки	H_1 = 40,94 мм; H_2 = 40,99 мм
Расстояние с.р.с. от внутренней поверхности дна	$h_1^{с}$ = $h_2^{с}$ =25,6 мм
Высота ската	$h_{ск1}$=(9,4 – 7,85)/2tg15°= 2,89 мм; $h_{ск2}$ = 4 мм
Высота дульца на первой операции Высота дульца на второй операции	$h_1^{д}$ = 4,96 мм; $h_2^{д}$ = 5,6 мм
Средний диаметр заготовки в в.р.с.	$d_{ср1}^{в}$ = 7,85 – 0,315 = 7,535 мм; $d_{ср2}^{в}$ = 5,955 мм
Средняя толщина стенки	$S_{ср1}^{в}$ = (0,28+0,35)/2 = 0,315 мм; $S_{ср1}^{в}$ = 0,335 мм
Средний диаметр заготовки в с.р.с.	$d_{ср1}^{с}$= 9,4 – 0,5975 = 8,8 мм; $d_{ср1}^{с}$= 6,85 мм

Таблица 10.17

Результаты расчета объемов и высот заготовки после первого обжима

Номер элемента	Границы элемента	Объем элемента, мм^3	Высота элемента, мм
1	в.р.с. – V р.с.	$V_в$ = 31,89	$h_в$ = 4,96
2	V р.с. – с.р.с.	V_5 = 31,17	h_5 = 3,83
3	с.р.с. – IV р.с.	V_c = 91,13	h_c = 8,10
4	IV р.с. – III р.с.	V_4 = 99,53	h_4 = 6,85
5	III р.с. – II р.с.	V_3 = 129,1	h_3 = 6,8

Эскиз заготовки после первого обжима показан на рис. 10.46.

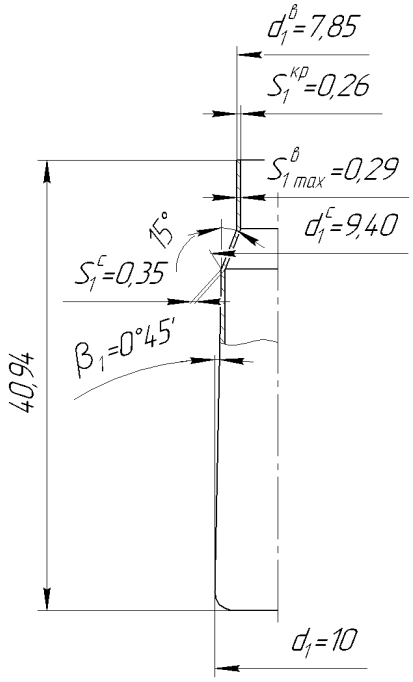


Рис. 10.46. Эскиз заготовки после первого обжима

Таблица 10.18

Расчетные размеры исходной заготовки и заготовок после первого и второго обжима

Расчетная величина		Исходная заготовка	После 1-го обжима	После 2-го обжима
1		2	3	4
Наружный диаметр в р.с., мм	$d^в$	10	7,85	6,29
	d^5		7,85	6,29
	$d^с$		9,4	9,25
	d^4		9,6	9,47
	d^3		9,75	9,66
	d^2		9,9	9,85
	$d^н$		10	10

Окончание табл.10.18

1	2	3	4	5
Толщина стенки заготовки в р.с., мм	$S^{в}$	0,23	0,27	0,31
	S^{5}	0,23	0,27	0,31
	$S^{с}$	0,34	0,35	0,36
	S^{4}	0,43	0,44	0,45
	S^{3}	0,56	0,57	0,58
	S^{2}	0,74	0,75	0,75
	$S^{н}$	0,84	0,845	0,845
Высота элемента гильзы, мм	$h_{в}$	4,72	4,96	5,6
	h_{5}	3,65	3,83	4
	$h_{с}$	7,84	8,1	8
	h_{4}	6,74	6,85	6,8
	h_{3}	6,76	6,8	6,8
Расстояние р.с. от внутренней поверхности дна заготовки, мм	$h^{в}$	33,71	34,54	35,2
	h^{5}	28,99	29,58	29,6
	$h^{с}$	25,34	25,75	25,6
	h^{4}	17,50	17,65	17,6
	h^{3}	10,76	10,8	10,8
	h^{2}	4	4	4
	$h^{н}$	2	2	2
Высота заготовки, мм	H	40,11	40,94	41,6

10.8.6. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента (матриц обжима)

Исходные данные – чертежи заготовок по операциям.

Расчетные формулы приведены в табл. 10.9, результаты расчета – в табл. 10.19.

Т а б л и ц а 10.19

Результаты расчета исполнительных размеров рабочего инструмента

Определяемая величина	Полученное значение
1	2
Диаметр матрицы в в.р.с. дульцевой части: на первой операции на второй	 $d_{м1}{}^{в}$ = (7,85)+0,015 = 7,85+0,015 мм; $d_{м2}{}^{в}$ = (6,29 – 0,12 – 0,0629)+0,015 = 6,12+0,015 мм
Максимальный наружный диаметр заготовки на последнем обжиме в в.р.с.	$d_{nmax}{}^{в}$ = 6,29 мм
Верхнее отклонение на диаметр матрицы в в.р.с.	$T_{пв}{}^{в}$ = 0 мм

Продолжение табл. 10.19

1	2
Допуск на износ матрицы в в.р.с.	$П_{изн}^{в} = 0,8*(0 – (- 0,15)) = 0,12$ мм
Поле допуска	$П_{д}^{в} = 0 – (- 0,15) = 0,15$ мм;
Нижнее отклонение на диаметр матрицы в в.р.с.	$T_{пн}^{в} = - 0,15$ мм
Упругая разгрузка (распружинивание)	$\delta_{у}^{в} = 0,01*6,29 = 0,0629$ мм
Диаметр матрицы в с.р.с. (у ската): на первой операции на второй	 $d_{м1}^{с} = (9,40)+0,015 = 9,4+0,015$ мм; $d_{м2}^{с} = (9,25-0,04-0,0925)+0,015 = 0,993*9,25 = 9,18+0,015$ мм;
Максимальный наружный диаметр заготовки после последнего обжима в с.р.с.	$d_{nmax}^{с} = 9,25$ мм;
Верхнее отклонение на диаметр матрицы в с.р.с.	$T_{пв}^{с} = 0$ мм;
Допуск на износ матрицы в с.р.с.	$П_{изн}^{с} = 0,8*0,05 = 0,04$ мм;
Поле допуска	$П_{д}^{с} = 0,05$ мм;
Нижнее отклонение на диаметр матрицы в с.р.с.	$T_{пн}^{с} = - 0,05$ мм;
Распружинивание	$\delta_{у}^{с} = 0,01*9,25 = 0,0925$ мм;
Диаметр матрицы в н.р.с.: на первой операции на второй	 $d_{м1}^{н} = (9,95)+0,015 = 9,95+0,015$ мм; $d_{м2}^{н} = 9,925*1,0 = 9,925+0,015$ мм
Максимальный наружный диаметр заготовки в н.р.с.	$d_{nmax}^{н} = 9,925$ мм;
Верхнее отклонение на диаметр матрицы в н.р.с.	$T_{пв}^{н} = 0$ мм;
Расстояние до н.р.с.: на первой операции на второй	 $h_{м1}^{н} = 5$ мм; $h_{м2}^{н} = 2 + 1,5 = 3,5$ мм
Радиус входной кромки матрицы	$R_1 = 5$ мм; $R_2 = 5 / 2,5 = 2$ мм
Расстояние до с.р.с.: на первой операции на второй	$h_{м1}^{с} = \frac{5 + 25,6 – 2}{1,02} = 28,04$ мм; $h_{м2}^{с} = (3,5+25,6 – 2)*0,999 = 27,07$ мм;
Расстояние до верхней кромки ската: на первой операции на второй	 $(h_{мск})_1 = (28,04+2,89) / 1,01 = 30,62$ мм; $(h_{мск})_2 = (27,07 + 4)*0,998 = 31,01$ мм
Расстояние с.р.с. до внутренней поверхности дна	$h_{м}^{с} = 30 – 4,4 = 25,6$ мм
Углы конусности	$\alpha_1 = 15°$; $\alpha_2 = 20°$; $\beta_1 = 45'$; $\beta_2 = 1°$
Диаметр обжимного стержня	$d_{iоб} = (6,29 – 2*0,31) – 2*0,28 + 0,05 = 5,16$ мм

10.8.7. Расчет технологических усилий

Расчет выполнен по алгоритму и расчетным схемам (рис. 10.43) и формулам (10.148)...(10.167), приведенных в п. 10.7.8.

Расчет технологического усилия на первой операции обжима. Максимальное меридиональное напряжение на первой стадии:

$$R_{o1} = \frac{9{,}95 - 0{,}845}{2} = 4{,}55 \text{ мм};$$

$$h_{11} = 28{,}04 - 5 = 23{,}04 \text{ мм};$$

$$\sigma_{\rho 11} = -2 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 488 \cdot (1 + 0{,}12 \cdot \operatorname{ctg} 15^{o}) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{4{,}55 - 23{,}04 \cdot \operatorname{tg} 45^{\circ}}{4{,}55}}\right) = -388{,}5 \text{ МПа},$$

где $b = \frac{2}{\sqrt{3}}$; $\sigma_{11} = 488$ МПа (с учетом наклепанного на вытяжке корпуса); $f = 0{,}12$; $\alpha_1 = 15^{o} = 0{,}26$ рад; $\beta_1 = 45^{'}$.

Интенсивность напряженного состояния на второй стадии процесса

$$\sigma_{12} = -\sqrt{3} \cdot (-388{,}5) = 672{,}1 \text{ МПа}.$$

Максимальное меридиональное напряжение на второй стадии процесса

$$\sigma_{\rho i2} = \sigma_{\rho i1} + \Delta\sigma_{\rho i2}\sqrt{\frac{\rho_{12}}{\rho_{11}}};$$

$$R_{\rho 1} = \frac{0{,}28 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(2 \cdot \frac{4{,}71}{0{,}28} - \cos 45' + \sin 45' \cdot \operatorname{tg} \frac{15^{o} - 45'}{2}\right)}}{\sin(15^{o} - 45')} = 4{,}60 \text{ мм},$$

где $R_{м1} = \frac{d_{м1}^{c}}{2} = 4{,}71$ мм;

$$b_1 = (4{,}60 + \frac{0{,}28}{2}) \cdot \operatorname{tg} \frac{15^{o} - 45'}{2} = 0{,}59 \text{ мм};$$

$$\rho_{12} = 4{,}71 + 0{,}59 \cdot \cos 15^{\circ} = 5{,}28 \text{ мм};$$

$$\Delta\sigma_{\rho 12} = \frac{-2 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 672{,}1 \cdot \sin(15^{o} - 45')}{\sqrt{8 \cdot \left(2 \cdot \frac{4{,}71}{0{,}28} - \cos 45' + \sin 45' \cdot \operatorname{tg} \frac{15^{o} - 45'}{2}\right)}} = -23{,}6 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\rho 12} = -388,5 - 23,6 \cdot \sqrt{\frac{5,28}{4,25}} = -414,8 \text{ МПа}.$$

Меридиональное напряжение на третьей стадии процесса

$$_{\Delta}\sigma_{\rho 13} = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\rho 13} = \sigma_{\rho 12} = -414,8 \text{ МПа}.$$

Интенсивность напряженного состояния на четвертой стадии процесса

$$\sigma_{14} = -\sqrt{3} \cdot (-414,8) = 717,6 \text{ МПа}.$$

Максимальное меридиональное напряжение на четвертой стадии процесса

$$\rho_{13} = \frac{d_{м1}^{в}}{2} = 3,93 \text{ мм};$$

$$h_{12} = (5,28 - 3,93) \cdot \frac{1}{\text{tg}15^{o}} = 5,03 \text{ мм};$$

$$\sigma_{\rho 14} = -2 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 717,6 \cdot (1+0,12 \cdot \text{ctg}15^{o}) \times$$

$$\times \left(1 - \sqrt{\frac{4,71 - \sin 15^{o} \cdot (4,60 + \frac{0,28}{2} \cdot \text{tg}\frac{15^{o} - 45'}{2}) - \frac{0,28}{2} \cdot \cos 15^{o} - 5,03 \cdot \text{tg}15^{o}}{4,71 - \sin 15^{o} \cdot (4,60 + \frac{0,28}{2} \cdot \text{tg}\frac{15^{o} - 45'}{2}) - \frac{0,28}{2} \cdot \cos 15^{o}}} \right) =$$

$$= -539 \text{ МПа}.$$

Меридиональное напряжение на пятой стадии процесса

$$_{\Delta}\sigma_{\rho 15} = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\rho 15} = \sigma_{\rho 14} = -539 \text{ МПа}.$$

Меридиональное напряжение на седьмой стадии процесса

$$\rho_{14} = \frac{7,865}{2} - \frac{0,28}{0,629} = 3,49 \text{ мм};$$

$$R_{\rho 12} = \sqrt{\frac{5,28 \cdot 0,28}{8 \cdot 0,26 \cdot \sin 15^{o}}} = 1,66 \text{ мм};$$

$$R_{\rho 13} = \sqrt{\frac{0,28 \cdot (3,93 + 3,49)}{4 \cdot (0,26 \cdot \sin 15^{o} + \cos 15^{o} - 1)}} = 3,95 \text{ мм};$$

$$\sigma_{\rho 17} = -539 - \frac{\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 717,6 \cdot 0,28}{4} \cdot \left(\frac{1}{1,66} + \frac{1}{3,95}\right) = -588,7 \text{ МПа}.$$

Максимальное меридиональное напряжение

$$\sigma_{\rho 1max} = \sigma_{\rho 17} = -588{,}7 \text{ МПа}.$$

Максимальное технологическое усилие на первой операции обжима

$$P_{1max} = P_{17} = 2\cdot 3{,}14\cdot \frac{9{,}95-0{,}845}{2}\cdot 0{,}845\cdot\left|-588{,}7\right| = 14222{,}1 \text{ Н}.$$

Расчет технологического усилия на второй операции обжима. Максимальное меридиональное напряжение на первой стадии:

$$R_{02} = \frac{9{,}925-0{,}845}{2} = 4{,}54 \text{ мм};$$

$$h_{21} = 27{,}07 - 2 = 25{,}07 \text{ мм};$$

$$\sigma_{\rho 21} = -2\cdot\frac{2}{\sqrt{3}}\cdot 500\cdot(1+0{,}12\cdot \operatorname{ctg}1^{o})\cdot\left(1-\sqrt{\frac{4{,}54-25{,}07\cdot \operatorname{tg}1^{o}}{4{,}54}}\right) = -452{,}8 \text{ МПа},$$

где $b = \frac{2}{\sqrt{3}}$; $\sigma_{21} = 500$ МПа; $f = 0{,}12$; $\alpha_2 = 20^{o} = 0{,}35$ рад; $\beta_2 = 1^{o}$.

Интенсивность напряженного состояния на второй стадии процесса

$$\sigma_{22} = -\sqrt{3}\cdot(-34{,}13) = 783{,}3 \text{ МПа}.$$

Максимальное меридиональное напряжение на второй стадии процесса

$$R_{\rho 2} = \frac{0{,}31\cdot\sqrt{\frac{1}{2}\cdot\left(2\cdot\frac{4{,}55}{0{,}31}-\cos 1^{o}+\sin 1^{o}\cdot \operatorname{tg}\frac{20^{o}-1^{o}}{2}\right.}}{\sin(20^{o}-1^{o})} = 3{,}59 \text{ мм},$$

где $R_{м2} = \frac{d^{c}_{м2}}{2} = 4{,}55$ мм;

$$b_2 = (3{,}59 + \frac{0{,}31}{2})\cdot \operatorname{tg}\frac{20^{o}-1^{o}}{2} = 0{,}63 \text{ мм};$$

$$\rho_{22} = 4{,}55 + 0{,}63\cdot\cos 20^{o} = 5{,}14 \text{ мм};$$

$$\Delta\sigma_{\rho 22} = \frac{-2\cdot\frac{2}{\sqrt{3}}\cdot 783{,}3\cdot\sin(20^{o}-1^{o})}{\sqrt{8\cdot\left(2\cdot\frac{4{,}55}{0{,}31}-\cos 1^{o}+\sin 1^{o}\cdot \operatorname{tg}\frac{20^{o}-1^{o}}{2}\right)}} = -39{,}1 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\rho 22} = -452{,}8 - 39{,}1 \cdot \sqrt{\frac{5{,}14}{4{,}10}} = -496{,}6 \text{ МПа}.$$

Меридиональное напряжение на третьей стадии процесса

$$_{\Delta}\sigma_{\rho 23} = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\rho 23} = \sigma_{\rho 22} = -496{,}6 \text{ МПа}.$$

Интенсивность напряженного состояния на четвертой стадии процесса

$$\sigma_{24} = -\sqrt{3} \cdot (-496{,}6) = 859{,}1 \text{ МПа}.$$

Максимальное меридиональное напряжение на четвертой стадии процесса

$$\rho_{23} = \frac{d_{м2}^{в}}{2} = 3{,}06 \text{ мм};$$

$$h_{22} = (5{,}14 - 3{,}06) \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} 20^{o}} = 5{,}71 \text{ мм};$$

$$\sigma_{\rho 24} = -2 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 859{,}1 \cdot (1 + 0{,}12 \cdot \operatorname{ctg} 20^{o}) \times$$

$$\times \left(1 - \sqrt{\frac{4{,}55 - \sin 20^{o} \cdot (3{,}59 + \frac{0{,}31}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{20^{o} - 1^{o}}{2}) - \frac{0{,}31}{2} \cdot \cos 20^{o} - 5{,}71 \cdot \operatorname{tg} 20^{o}}{4{,}55 - \sin 20^{o} \cdot (3{,}59 + \frac{0{,}31}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{20^{o} - 1^{o}}{2}) - \frac{0{,}31}{2} \cdot \cos 20^{o}}} \right) =$$

$$= -1091{,}2 \text{ МПа}.$$

Меридиональное напряжение на пятой стадии процесса

$$_{\Delta}\sigma_{\rho 25} = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\rho 25} = \sigma_{\rho 24} = -82{,}34 \text{ МПа}.$$

Меридиональное напряжение на седьмой стадии процесса

$$\rho_{24} = \frac{6{,}1221}{2} - \frac{0{,}31}{0{,}629} = 2{,}57 \text{ мм};$$

$$R_{\rho 22} = \sqrt{\frac{5{,}14 \cdot 0{,}31}{8 \cdot 0{,}35 \cdot \sin 20^{o}}} = 1{,}29 \text{ мм};$$

$$R_{\rho 23} = \sqrt{\frac{0{,}31 \cdot (3{,}06 + 2{,}57)}{4 \cdot (0{,}35 \cdot \sin 20^{o} + \cos 20^{o} - 1)}} = 2{,}71 \text{ мм};$$

$$\sigma_{\rho 27} = -1091{,}2 - \frac{\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 859{,}1 \cdot 0{,}31}{4} \cdot \left(\frac{1}{1{,}29} + \frac{1}{2{,}71}\right) = -1179{,}3 \text{ МПа}.$$

Максимальное меридиональное напряжение

$$\sigma_{\rho 2max} = \sigma_{\rho 27} = -1179{,}3 \text{ МПа}.$$

Максимальное технологическое усилие на второй операции обжима

$$P_{2max} = P_{27} = 2 \cdot 3{,}14 \cdot \frac{9{,}925 - 0{,}845}{2} \cdot 0{,}845 \cdot \left|-1179{,}3\right| = 28407{,}9 \text{ Н}.$$

Библиографический список

1. *Лясников А.В.*, Агеев Н.П., Кузнецов Д.П., Данилин Г.А. и др. Сопротивление материалов пластическому деформированию в приложениях к процессам обработки металлов давлением. СПб.: Внешторгиздат-Петербург, 1995. 527 с.
2. *Агеев Н.П.*, Данилин Г.А., Огородников В.П. Технология производства выстрелов. Ч. 2: учебник. / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2006. 533 с.
3. *Попов Е.А.* Основы теории листовой штамповки: учебное пособие. М.: «Машиностроение», 1977. 278 с.
4. *Аверкиев Ю.А.* Исследование обжима полых цилиндрических заготовок. В кн. «Инженерные методы расчетов процессов обработки металлов давлением» / Под. ред. В.С. Смирнова. М.-Л.: Машгиз, 1957. С. 167…190.
5. *Мельников Э.Л.* Холодная штамповка днищ. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.
6. *Агеев Н.П.*, Кривицкий Б.А. Анализ условий устойчивости тонкостенных заготовок при обжиме в конической матрице // Известия вузов. Машиностроение. 1980. №1. С. 96…100.
7. *Агеев Н.П.*, Данилин Г.А., Огородников В.П. Технология производства патронов стрелкового оружия: учебник. Ч.1. Технологические основы проектирования патронов / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2005. 352 с.
8. *Агеев Н.П.*, Кривицкий Б.А. Предотвращение гофрообразования при обжиме // Вестник машиностроения. 1982, №12.
9. *Агеев Н.П.*, Афанасьев А.С., Дриго А.В., Морозов С.А. Автоматизированное проектирование технологического процесса обжима полых заготовок: учебное пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 1993. 74 с.

11. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ОЖИВАЛЬНОЙ ЧАСТИ ПУЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК

11.1. Способы формообразования

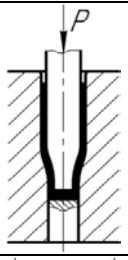
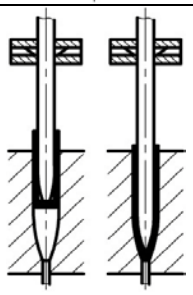
В соответствии с классификацией процессов холодной штамповки рассматриваемые процессы формообразования оживальной части оболочек из полых цилиндрических заготовок относятся к процессам листовой и комбинированной объемно-листовой штамповки. Последнее определяется схемой НДС.

Формообразование оживальной части оболочек может выполняться различными способами (табл. 11.1): ступенчатой вытяжкой, бесступенчатой вытяжкой, обжимом (продольным свободным, с подпором по наружной и внутренней поверхностям), бесступенчатой вытяжкой–раздачей, ступенчатой вытяжкой–раздачей, обжимом–раздачей.

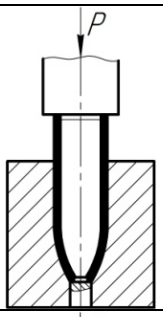
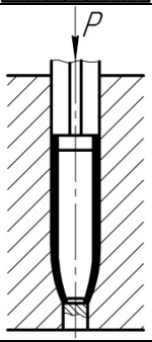
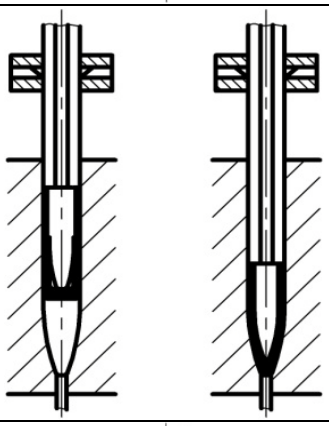
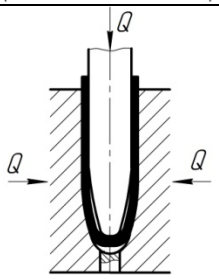
Способы обжима могут использоваться при условии применения трубных заготовок для изготовления оболочек с отверстиями в вершине или полых заготовок с дном в случае совмещения процессов формообразования оживальной части пули с одновременной сборкой (монтажом) ее элементов. Этот вариант применяется для изготовления пуль к охотничьим патронам. Для этого случая может применяться методика проектирования технологических процессов обжима гильз, рассмотренная в разд. 10.

Таблица 11.1

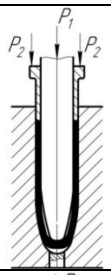
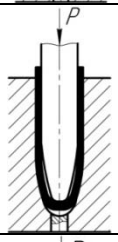
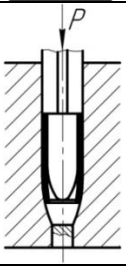
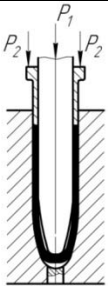
Способы формообразования оживальной части пульных оболочек

Операция	Способ	Схема
1	2	3
Простые операции		
Вытяжка	Ступенчатая вытяжка без утонения	
	Бесступенчатая вытяжка без утонения	

Продолжение табл. 11.1

1	2	3
Обжим в штампах	Свободный обжим	
	Обжим с наружным подпором	
	Обжим с наружным и внутренним подпорами	
	Ротационный обжим	

Окончание табл. 11.1

Комбинированные операции		
1	2	3
Вытяжка, обжим, раздача	Вытяжка–обжим	
	Вытяжка–раздача	
	Обжим–раздача	
	Вытяжка–обжим–раздача	

В производстве применяются две основные разновидности процесса: бесступенчатое формообразование, ступенчатое формообразование оживальной части оболочки.

Формообразование («обжим») оживальной части оболочек преимущественно выполняется в инструментальных штамповых блоках (ИШБ) (рис. 11.1) на автоматических роторных линиях (АРЛ), а также может выполняться в штампах на прессах. Принятый на производстве термин «обжим»

следует считать условным, так как он не отражает схемы нагружения, НДС присущего этому процессу, а следовательно, его технологические особенности и возможности.

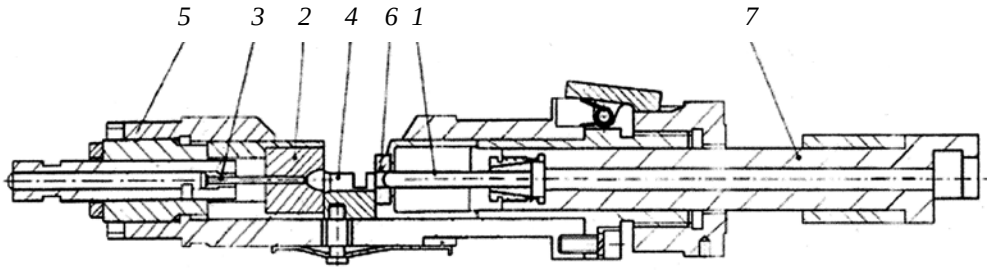


Рис. 11.1. Эскиз инструментального блока 1-го «обжима» оболочек: *1* – пуансон; *2* – матрица; *3* – шток; *4* – втулка; *5* – корпус; *6* – съемник

Поэтому технологи должны отдавать себе отчет в том, что, несмотря на применение термина «обжим», методы расчетов технологических параметров не соответствуют «классическому» обжиму, который характеризуется заталкиванием, как правило, трубной заготовки, а не втягиванием полой с дном в матрицу.

11.2. Технологические особенности и возможности процесса бесступенчатого формообразования

Согласно технологической схеме этого процесса (рис. 11.2) формообразование полой тонкостенной заготовки с оживальным профилем образующей осуществляется путем втягивания пуансоном полой, с дном, заготовки в матрицу, имеющей оживальный профиль, до контакта с рабочим инструментом по наружной и внутренней поверхностям. Процесс делится на две основных стадии.

Первая стадия – пространственное формоизменение заготовки без принудительного изменения толщины стенки (рис. 11.2,*а*,*б*,*в*).Заготовка втягивается в матрицу, ОПД и поверхность контакта с инструментом непрерывно увеличиваются как за счет обжатия цилиндрической части исходной полой заготовки, так и за счет разгибания угловой зоны и втягивания дна. Интенсивность роста усилия (рис. 11.2,*а*) при этом невелика. Размеры заготовки в тангенциальном направлении уменьшаются, за исключением участка дна, где происходит двустороннее растяжение наружных слоев металла. К моменту

окончания первой стадии наружная поверхность заготовки практически полностью соприкасается с рабочей поверхностью матрицы, а пуансон вступает в контакт с придонным участком заготовки (рис. 11.2, *в*).

Вторая стадия соответствует деформированию от момента полного прилегания наружной поверхности заготовки к поверхности матрицы и до окончания процесса штамповки (рис. 11.2,*а*,*г*). В это время происходит принудительное утонение стенки в зоне придонного участка с одновременным набором металла в зоне вершины, за счет его выдавливания и утолщения вершины. Размеры заготовки в окружном направлении практически не изменяются.

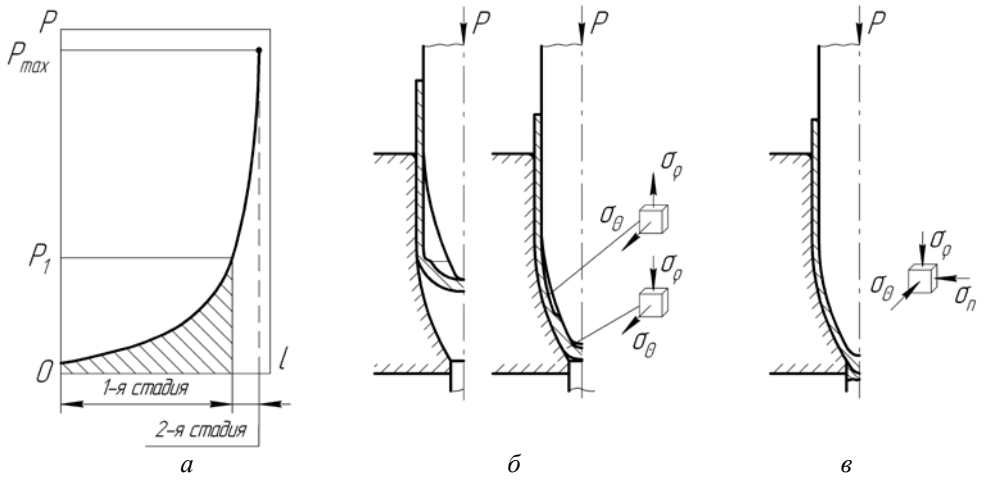


Рис. 11.2. Технологическая схема бесступенчатого формообразования оживальной части оболочек: *а* – машинная диаграмма «*P*–*h*»;*б*, *в*, *г* – основные этапы формоизменения

Основные параметры процесса «обжима» оживальных оболочек:

- степень деформации, в том числе ее предельные и допустимые значения;
- максимальное технологическое усилие;
- удельное усилие, действующее на инструмент;
- величина рабочего хода инструмента.

Обжим оболочек характеризуется неравномерностью деформации вдоль образующей. Наиболее деформированной является зона оживальной части, расположенная вблизи опасного сечения. Поэтому для оценки общей, накопленной за две стадии, деформации на любой *i*-й операции принят итоговый коэффициент обжима, определяемый как отношение наружного диаметра штампуемого полуфабриката в нижнем расчетном («опасном») сечении d_i к наружному диаметру исходной заготовки D_o, т.е.

$$m_i = d_i / D_o \ . \qquad (11.1)$$

Размер d_i часто в чертеже не указывается и рассчитывается по формуле

$$d_i = 2\left[\sqrt{R_{\text{н}i}^2 - \left(h_i - S_{\text{в}i} - r_i\right)^2} - R_{\text{н}i} + 0{,}5D_o\right], \qquad (11.2)$$

где $R_{\text{н}i}$ – наружный радиус кривизны оживальной части заготовки; h_i – высота оживальной части заготовки; $S_{\text{в}i}$ – толщина вершины заготовки; r_i – радиус сопряжения оживальной части и вершины заготовки по внутренней поверхности на i-й операции (рис. 11.3).

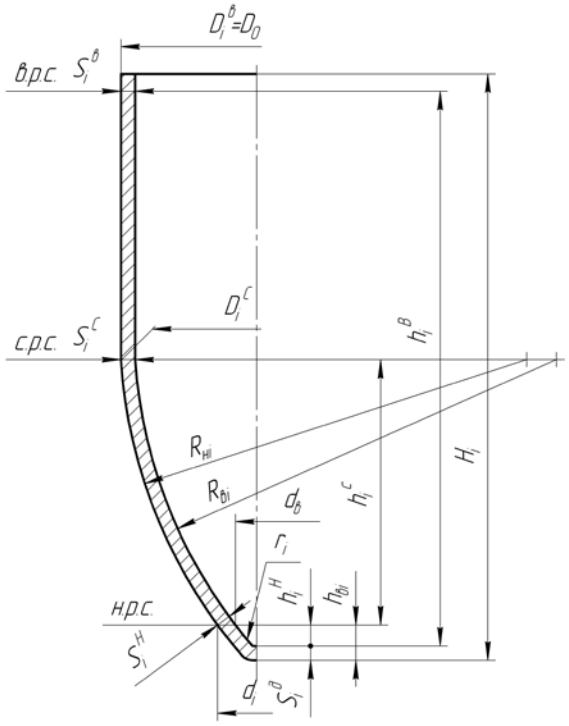


Рис. 11.3. Эскиз заготовки после i-й операции

На первой стадии деформирования коэффициенты обжима рассчитываются без учета принудительного утонения стенки на второй стадии:

$$M_i = \left(d_{\text{к}i} + 2S_{i-1}^{\text{д}}\right) \Big/ D_o\,, \qquad (11.3)$$

где $d_{\text{к}i} = d_i - 2S_i^{\text{н}}$ – внутренний диаметр заготовки в нижнем расчетном сечении после деформирования на i -й операции; $S_i^{\text{н}}$ – толщина стенки заготовки в нижнем расчетном сечении после i-й операции; $S_{i-1}^{\text{д}}$ – толщина дна исходной заготовки.

На второй стадии процесса при определении степени деформации в нижнем расчетном сечении учитывается принудительное утонение стенки и изменение диаметра заготовки:

$$e_i = \ln \frac{S_o^{д}}{m_i S_i^{н}}. \qquad (11.4)$$

При многооперационном формообразовании величина накопленной деформации определяется по формулам

$$m_{i\Sigma} = \prod_{i=1}^{n} m_i ; \qquad (11.5)$$

$$e_{i\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} e_{ii} , \qquad (11.6)$$

где $m_{i\Sigma}$, $e_{i\Sigma}$ – показатели накопленной деформации; m_i, e_{ii} – показатели степени деформации на i-й операции; n – число операций.

Предельная степень деформации ($m_{пр}$) – это та степень деформации, которая сопровождается разрушением заготовки на первой стадии в «опасном» сечении с образованием поперечной трещины.

На величину предельной до разрушения степени деформации $m_{пр}$ влияют следующие основные технологические факторы: марка и механические свойства материала исходной заготовки, относительный радиус кривизны оживальной части оболочки $\gamma = 2R_{\rho i}/D$, относительная толщина стенки $S_o^{д}/S^{н}$, условия контактного трения (вид технологического покрытия, коэффициент трения f).

Так как перед «обжимом» заготовка отжигается, то механические свойства материала соответствуют отожженному состоянию. Наличие на заготовках медного, латунного и томпакового покрытий в сочетании со смазкой (машинное масло) соответствует контактным условиям при коэффициенте трения $f \cong 0{,}10$. Деформирование заготовок без покрытия с машинным маслом приближенно равноценно условиям трения, когда $f \cong 0{,}15$.

При наличии прочного металлического покрытия все применяемые смазки не дают ощутимого эффекта, так как основную роль в создании благоприятных контактных условий играет прочная пленка пластичного металла, способная на протяжении всего процесса деформации удерживать жидкую смазку.

Характер влияния условий трения оказывается примерно одинаковым для оболочек с различной кривизной и разным соотношением толщины дна и боковой стенки.

Качество поверхности деформированных заготовок без покрытия, как правило, хуже чем заготовок с покрытием.

С увеличением относительного радиуса кривизны фигуры оболочки $\gamma_i = 2R_{ni}/D_i^{в}$ предельные коэффициенты формоизменения $m_{пр}$ возрастают, что связано с ростом растягивающих напряжений в опасном сечении заготовки на первой стадии. Это ограничивает технологические возможности процесса и требует увеличения числа операций.

С увеличением отношения толщины $S_o^{д}/S^{н}$ значение $m_{пр}$ уменьшается, что расширяет технологические возможности процесса. Большая толщина дна способствует уменьшению растягивающего напряжения σ_ρ за счет увеличения площади поперечного сечения в зоне наиболее вероятного разрушения, но в то же время приводит к некоторому увеличению изгибающего момента при втягивании дна заготовки. Влияние отношения $S_o^{д}/S^{н}$ на $m_{пр}$ приближенно может быть учтено формулой

$$m_{пр} = m'_{пр} - k_S\left(S_o^{д}/S - 1\right), \qquad (11.7)$$

где $m'_{пр}$ – предельный коэффициент для заготовок с $S_o^{д}/S^{н}$ = 1,0; k_S – коэффициент (k_S = 0,212 для стали 11кп; k_S = 0,125 для биметалла-3; k_S = 0,106 для стали 11ЮА).

Допустимое значение коэффициента «обжима» назначается в зависимости от его предельного значения $m_{пр}$ с учетом коэффициента запаса пластичности k_m:

$$m_{доп} = k_m m_{пр}, \qquad (11.8)$$

где k_m = 1,02…1,05.

Максимальное за весь процесс формообразования оживальной части оболочки технологическое усилие развивается в конечный момент штамповки и определяется той работой, которую совершает пуансон, утоняя стенку и преодолевая силы трения:

$$P = P_ф + P_{тр} + \Delta P, \qquad (11.9)$$

где $P_ф$ – составляющая усилия, затрачиваемая на утонение стенки; $P_{тр}$ – составляющая усилия, затрачиваемая на преодоление сил трения; ΔP – усилие редуцирования дна.

Максимальное усилие определяется в основном составляющими $P_ф$ и $P_{тр}$ и в большей степени зависит от протяженности участка утонения стенки, условий трения, геометрии рабочего инструмента, способности материала упрочняться и некоторых других факторов. На максимальное усилие влияют следующие факторы:

- степень принудительного утонения стенки вершины;
- коэффициент обжима (m);
- относительный радиус кривизны фигуры оболочки (γ);
- условия контактного трения (f);
- механические свойства материала заготовки ($\sigma_в$).

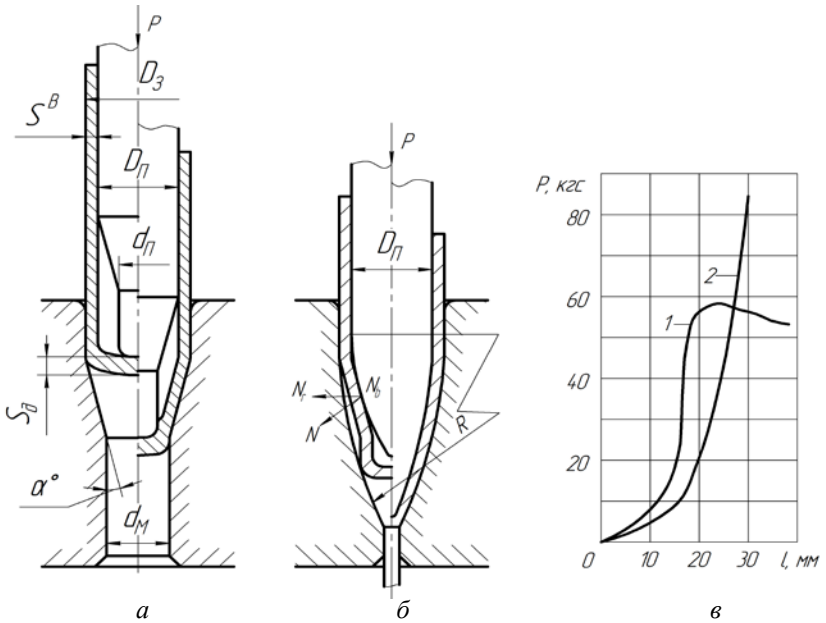
Увеличение сопротивления деформированию ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_в$, σ_i), степени утонения стенки, относительного радиуса кривизны γ и коэффициента трения f способствуют росту меридиональных и нормальных контактных напряжений, удельных усилий q и полных технологических усилий. Усилие, затрачиваемое в конце второй, завершающей, стадии, в 2…5 раз превосходит максимальное усилие на первой стадии, когда заготовка втягивается в полость матрицы. Формулы для расчета усилий приведены в подразд. 11.5.

11.3. Технологические особенности процесса ступенчатого формообразования

Ступенчатый способ отличается от бесступенчатого тем, что полуфабрикаты на промежуточных операциях имеют ступенчатую форму.

Анализ показывает, что наиболее рациональной является двухоперационная схема ступенчатого способа, когда только на первой операции заготовке придают ступенчатую форму.

На первой операции цилиндрический пуансон деформирует часть заготовки по схеме комбинированной вытяжки (рис. 11.4,*а*). Цель операции – максимально уменьшить диаметр заготовки. Поэтому здесь применяется такая форма рабочего инструмента, которая позволяет получить наибольшую деформацию по диаметру. Операция происходит также в две стадии. Первая стадия – деформирование заготовки без принудительного утонения,



а *б* *в*

Рис. 11.4. Технологические схемы ступенчатого способа вытяжки-раздачи: *а* – первая операция; *б* – вторая операция; *в* – характер изменения технологических усилий (*1* – первая операция, *2* – вторая операция)

в течение которого осуществляется пространственный изгиб донной части и оформление конического участка ОПД. Формоизменение характеризуется действием в опасном сечении растягивающих меридиональных (σ_ρ) и тангенциальных (σ_θ) напряжений. Вторая стадия процесса начинается с момента втягивания заготовки в нижнюю цилиндрическую часть матрицы. При этом плоская схема напряженного состояния в нижней части заготовки меняется на объемную вследствие возникновения нормальных сжимающих напряжений σ_n. На этой стадии происходит принудительное утонение стенки кольцевого участка дна и образование цилиндрической ступени. Смена стадий соответствует критическому моменту деформации, когда возможен отрыв дна.

На второй, чаще всего завершающей, операции происходит окончательное формирование оболочки (рис. 11.4,*б*). Формообразование радиусного профиля осуществляется за счет раздачи фигурной части, вытяжки донного участка и формовки стенки заготовки. При движении пуансона вниз на участке раздачи действуют растягивающие тангенциальные (σ_θ) и сжимающие (σ_ρ) меридиональные напряжения. При достижении пуансоном дна начинается процесс вытяжки верхней части оболочки. После того как поверхность заготовки войдет в полное соприкосновение с поверхностью матрицы, происходит объемное деформирование по толщине и калибровка радиусной части. В этот момент схема напряженного состояния соответствует всестороннему неравномерному сжатию, что подтверждается резким возрастанием деформирующего усилия.

Такая последовательность штамповки позволяет повысить степень деформации на первой операции за счет наиболее оптимальной (с точки зрения комбинированной вытяжки) формы рабочего инструмента и увеличить допустимую степень деформации на второй операции вследствие образования протяженной зоны раздачи и уменьшения участка вытяжки.

Таким образом, процесс вытяжки–раздачи как на первой, так и на последующих операциях представляется состоящим из двух стадий. Первая, в течение которой происходит основное формоизменение, соответствует вытяжке или вытяжке–раздаче куполообразных деталей в глухой матрице с радиусным рабочим профилем. Вторая стадия по схеме приложения сил и характеру течения металла представляет собой объемную формовку.

Вторая стадия отличается от первой тем, что на начальной стадии осуществляется раздача ступени и вытяжка вершины. На второй стадии происходит принудительное утонение стенки при создании в зоне очага деформации всестороннего неравномерного сжатия. Поэтому предельная деформация также ограничивается условием прочности в опасном сечении.

Наиболее благоприятными на второй операции следует считать такие условия, когда диаметр полуфабриката после первой операции минимальный, а ее высота не менее высоты оживальной части готовой оболочки. Такое соотношение размеров способствует созданию наибольшей по протяженности зоны раздачи, уменьшает растягивающие напряжения $\sigma_{\rho max}$ и повышает несущую способность опасного сечения.

11.4. Обеспечение качества штампуемых деталей

Оболочки после обжима контролируются по форме и размерам – лекальный контроль, по состоянию поверхности – визуальный осмотр.

При лекальном обмере контролируются:

- фигуры оживальной части оболочки и вершины;
- наружный диаметр вершины;
- наружный диаметр цилиндрической и оживальной частей оболочки;
- длина оживальной части оболочки;
- внутренний диаметр расправленной части оболочки;
- толщина стенки и разностенность.

Контролируемые размеры и тип применяемого контрольно-измерительного инструмента приведены в табл. 11.2, контроль диаметра вершины осуществляется шаблоном с проходным и непроходным размерами.

Таблица 11.2

Контроль размеров полуфабрикатов и готовых оболочек при «обжиме»

Операция	Контролируемые размеры	Контрольно-измерительный инструмент
Первый и промежуточный обжимы	Профиль оживальной части	Шаблон на профиль оживальной части
	Диаметр цилиндрической части оболочки	Кольцо на диаметр цилиндрической части оболочки
Последний обжим	Профиль оживальной части	Шаблон (лекало) на фигуру оживальной части
	Диаметр цилиндрической части оболочки	Кольцо на диаметр цилиндрической части оболочки
	Профиль вершины	Шаблон на вершину оболочки
	Высота оживальной части оболочки	Прибор на длину оживальной части оболочки
	Толщина стенки в контрольном сечении	Прибор для замера толщины стенки

В проходном размере вершина оболочки касается вершины шаблона, в непроходном входит с просветом. Проверка диаметра оживальной части осуществляется прибором с проходным и непроходным кольцами, проверка фигуры оживальной части – по шаблонам (лекалам). При удовлетворительном профиле оболочка должна упираться вершиной в донышко шаблона и оживалом сливаться с фигурой шаблона или иметь равномерный просвет. Длина оболочки проверяется скобой – лекалом, внутренний диаметр расправленной оболочки – калибром.

Толщина стенки и разностенность замеряются на определенном расстоянии от торцевого среза специальным прибором с микрометрическим винтом.

При визуальном контроле выявляется целый ряд дефектов, являющихся результатом неудовлетворительной наладки и установки рабочего инструмента, неправильного проектирования инструмента, некачественного материала и низкой культуры производства (табл. 11.3).

Таблица 11.3

Виды и причины брака при «обжиме» пульных оболочек

Вид	Причина
Визуальный осмотр	
Царапины на наружной и внутренней поверхностях	Отслаивание хрома на рабочих поверхностях инструмента. Налипание металла на поверхность рабочего инструмента. Загрязненная смазка, трещины на матрице
Помятости и забоины	Неправильная работа питателя, съемника
Отпечатки на поверхности	Попадание грязи в рабочую полость матрицы
Образование выступа на вершине	Неправильный размер выталкивателя или неточная его установка
Отпечаток (венчик) на вершине	Неудовлетворительная (изношенная) матрица, недостаточно металла в вершине
Прорыв вершины	Низкий коэффициент обжима, неудовлетворительные механические свойства полуфабрикатов, влажный или загрязненный полуфабрикат, выкрошена рабочая часть пуансона
Трещины поперечные, продольные наружные и внутренние	Заниженные коэффициенты обжима, неправильный режим отжига на вытяжках, выкрошенный рабочий инструмент
Лекальный контроль	
Косая фигура оболочки, наплыв на оживале, перелом, неплотное прилегание или неравномерный просвет по шаблону	Не сцентрирован пуансон относительно матрицы, неправильная фигура матрицы или пуансона, расслоение металла
Тупая вершина	Неточная установка рабочего инструмента или неточное его изготовление
Большой или малый диаметр вершины	Неправильно установлен рабочий инструмент

11.5. Технологические расчеты

11.5.1. Исходные данные и последовательность расчетов

Исходные данные:

- маршрутный технологический процесс;
- чертеж готовой детали.

Последовательность расчета:

- определение размеров конечной штампованной заготовки (после последнего «обжима»);

• определение уровня технологичности конструкции изделия и штампованной конечной заготовки (ТКИ);
• расчет размеров исходной заготовки;
• расчет количества операций;
• расчет размеров заготовок по операциям;
• расчет исполнительных размеров рабочего инструмента;
• расчет технологических усилий.

11.5.2. Расчет размеров конечной штампованной заготовки

Все необходимые для расчета размеры конечной заготовки принимают равными соответствующим чертежным размерам готовой оболочки. При этом основные определяемые размеры следующие (рис. 11.5):

• номинальный наружный диаметр цилиндрической части (в верхнем и среднем расчетных сечениях – в.р.с., с.р.с.) $D_n^{\text{в}}=D_n^{\text{с}}=D$;

• номинальный наружный диаметр в нижнем расчетном сечении (н.р.с.) $d_n=d$;

• внутренний диаметр в нижнем расчетном сечении ($d_{кп}=d_{к}=d-2S^{\text{н}}$);

• наружный радиус оживальной части ($R_{нп}=R_{н}$);

• внутренний радиус оживальной части ($R_{вп}=R_{в}$);

• внутренний радиус сопряжения вершины с оживальной частью $r_n=r$;

• номинальная толщина стенки цилиндрической части (в верхнем и среднем расчетных сечениях) $S_n^{\text{в}} = S_n^{\text{с}} = S_{\text{ц}}$;

• номинальная толщина в нижнем расчетном сечении ($S_n^{\text{н}}= S^{\text{н}}$);

• толщина вершины ($S_{\text{вн}}= S_{\text{в}}$);

• наружный диаметр вершины ($d_{вп}=d_{\text{в}}$).

Линейные размеры конечного полуфабриката назначают по соответствующим чертежным размерам готовой оболочки, высоту цилиндрической части полуфабриката h рассчитывают по высоте цилиндрической части оболочки с учетом припуска на обрезку:

$$h_{\text{цп}} = (1{,}25...1{,}30)(H - h); \qquad (11.10)$$

$$H_n = h + h_{\text{цп}}; \qquad (11.11)$$

$$h_n^{\text{н}} = r; \qquad (11.12)$$

$$h_n^{\text{в}} = H - S_{\text{в}}; \qquad (11.13)$$

$$h_n = h - S_{\text{в}} - r; \qquad (11.14)$$

$$h_{\text{вп}} = h^{\text{н}} + S_{\text{в}}. \qquad (11.15)$$

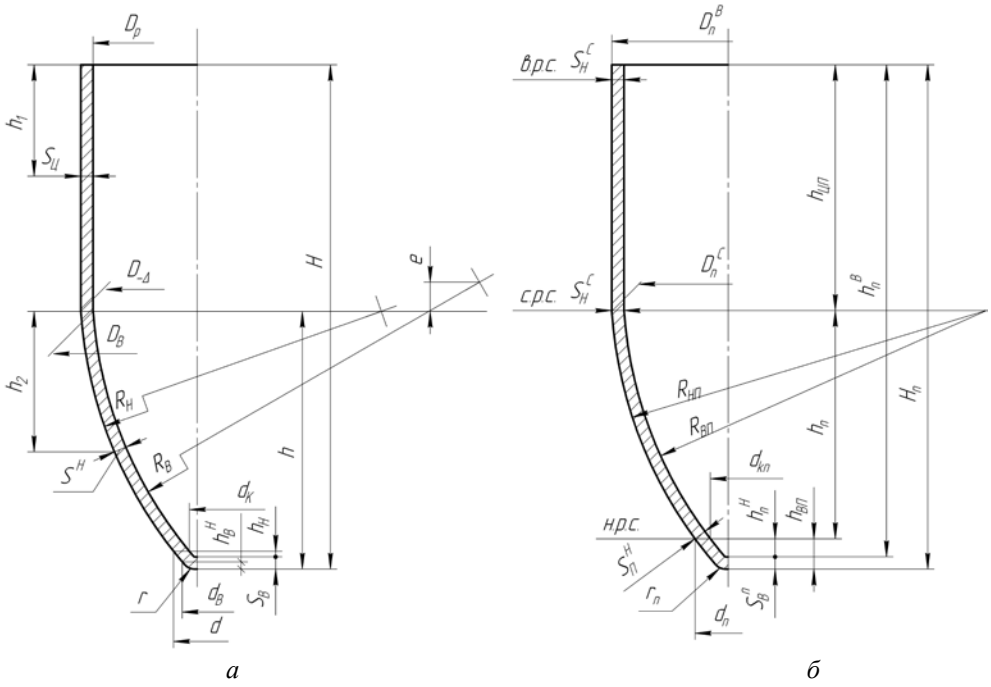


Рис. 11.5. Эскизы готовой оболочки (*а*) и конечной штампованной заготовки (*б*)

11.5.3. Оценка технологичности конструкции конечной штампованной заготовки

Уровень технологичности большинства выпускаемых предприятиями оболочек может быть оценен следующими показателями:

- итоговым коэффициентом обжима $m = d/D$;
- относительным радиусом кривизны головной части $\gamma = 2R_н/D$;
- соотношением между внутренним и наружным радиусами кривизны $R_н/R_в$;
- относительной толщиной стенки S/D ;
- относительной высотой оболочки H/D ;
- относительной толщиной вершины оболочки $S_в/S$;
- законом распределения толщины вдоль образующей $S_н/S$;
- относительным радиусом сопряжения вершины r/S ;
- механическими свойствами материала (характеристиками сопротивляемости деформированию $\sigma_{0,2}$, $\sigma_в$, σ_{ip} и пластичности ε_{iy}, ε_{ip});
- наличием на поверхности оболочки покрытия из пластичного материала.

Влияние приведенных показателей на уровень технологичности оболочек неравнозначно. Например, при сравнительном анализе конструкций механическими свойствами материала можно пренебречь, поскольку для изготовления оболочек применяют две марки материалов: сталь 11кп и биметалл-3. Указанные материалы имеют практически одинаковый химический состав и по существу не различаются своими механическими характеристиками. Изготовление основных конструктивных элементов производится операциями вытяжки и «обжима». Поэтому технологичность следует оценивать в первую очередь с точки зрения пригодности конструкции этой детали к указанным способам обработки. Показатели технологичности оболочек приведены в табл. 11.4.

Таблица 11.4

Контрольные уровни показателей ТКИ оболочек

Уровень технологичности	d/D	$2R_н/D$	$R_н/R$	$S_н/S$	$S_в/S$	r/S	S/D	H/D
Высокий	0,5	5	1,0	1,0	1,6...2,5	1,0... 2,0	Более 0,10	1,5
Средний	0,3... 0,5	5. ..15	1,0	1,0	1,2... 1,6	0,5... 1,0	0,07... 0,10	1,5... 4,0
Низкий	Менее 0,3	Более 15	1,0	1,0	1,0...1,2	0,5	0,05... 0,07	4,0

Технологичность оболочки снижается с уменьшением коэффициента обжима $m=d/D$, относительного радиуса сопряжения вершины r/S , относительной толщины вершины $S_в/S$, а также с увеличением радиуса кривизны фигуры $2R_н/D$. Относительно малая толщина вершины ($S_в/S < 1,0$) снижает прочность оболочек и затрудняет их изготовление. При большой толщине вершины ($S_в/S > 2,0$) в конце обжима резко возрастают удельные нагрузки на инструмент. С уменьшением относительной толщины стенки S/D возникает опасность складкообразования и необходимо большое количество вытяжных операций. Оболочки, у которых толщина в нижнем расчетном сечении меньше, чем в верхнем ($S_н/S < 1,0$), сложны в изготовлении, и на операциях обжима необходимо прилагать более высокие нагрузки на инструмент.

Выбор способа обжима оболочек также зависит от показателей, характеризующих уровень их технологичности. При наличии большого радиуса кривизны оживальной фигуры ($2R_н/D = 10... 25$ и более) рекомендуется применять ступенчатый обжим. Он позволяет довести количество операций обжима до двух, существенно снизить усилие деформирования, особенно на первой операции, упростить форму рабочего инструмента, повысить его стойкость.

При относительно небольших радиусах кривизны ($2R_н/D = 10$) и суммарных коэффициентах обжима $m \geq 0,3$ эффективно применение бесступенчатого обжима. Для изготовления оболочек, толщина стенки у которых уменьшается от верхнего сечения к нижнему ($S_н/S < 1,0$), предпочтительнее ступенчатый обжим. Это объясняется тем, что при деформировании заготов-

ки по бесступенчатой схеме на первом этапе происходит естественное утолщение стенки в зоне, прилегающей к нижнему расчетному сечению. Поэтому для последующего принудительного утонения стенки по всей поверхности радиусной части необходимы значительные удельные нагрузки на инструмент. В то же время такое распределение толщины ступенчатым обжимом не требует какого-либо заметного изменения силового режима и достигается последовательным утонением стенки в кольцевом зазоре между пуансоном и матрицей на первой операции. Для изготовления оболочек к изделиям малых и средних относительных размеров также рекомендуется применять ступенчатый обжим, так как при бесступенчатом из-за воздействия большого технологического усилия возможен изгиб пуансона и даже его поломка.

11.5.4. Расчет размеров исходной заготовки

Основные расчетные размеры исходной заготовки (рис. 11.6):

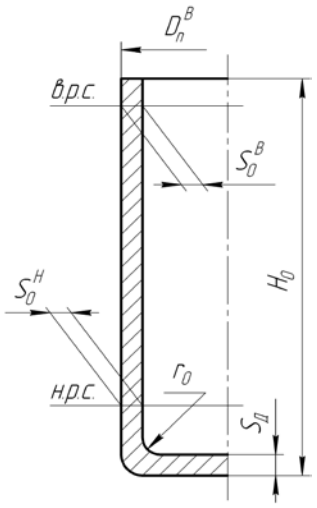


Рис. 11.6. Эскиз исходной заготовки

- наружный диаметр D_o;
- толщина сечения в верхнем и нижнем расчетных сечениях $S_o^в$, $S_o^н$;
- высота H_o;
- внутренний радиус сопряжения стенки с дном r_o;
- толщина дна $S_o^д$.

Диаметр и толщину сечения исходного полуфабриката принимают равными:

$$D_o = D_{\min} = D_n^в - \Delta D; \qquad (11.16)$$

$$S_o^н = S_n^н; \qquad (11.17)$$

$$S_o^в = S_n^в, \qquad (11.18)$$

где ΔD – нижнее отклонение на диаметр цилиндрической части оболочки.

Толщина дна исходного полуфабриката для оболочек, имеющих форму, близкую к полусферической, равна:

$$S_o^д = S_в. \qquad (11.19)$$

Толщина дна исходного полуфабриката для оболочек, имеющих остроконечную форму, находится в пределах:

$$S_o^д = (0{,}75...0{,}95)S_в. \qquad (11.20)$$

Внутренний радиус сопряжения цилиндрической и донной частей исходного полуфабриката принимают исходя из оптимальных условий проведения последней вытяжки:

$$r_o = (2{,}0...2{,}5)S_o^{\text{н}}. \qquad (11.21)$$

Высоту полуфабриката $H_{\text{о}}$ рассчитывают из условия равенства объемов готовой оболочки и заготовки с учетом отхода части металла, идущего на обрезку:

$$H_o = \frac{1{,}3V_{\text{ож}} - D^2 S_o^{\text{д}}}{4S_o^{\text{в}}\left(D - S_o^{\text{в}}\right)} + 1{,}3(H - h), \qquad (11.22)$$

где $V_{\text{ож}}$ – объем оживальной части готовой оболочки.

Объем оживальной части $V_{\text{ож}}$ находят как разность объемов, ограниченных наружным $V_{\text{н}}$ и внутренним $V_{\text{в}}$ профилями:

$$V_{\text{ож}} = V_{\text{н}} - V_{\text{в}}. \qquad (11.23)$$

Приближенно объем оживальной фигуры V ($V_{\text{н}}$, $V_{\text{в}}$) со смещенным и несмещенным центром кривизны может быть рассчитан как объем усеченного конуса $V_{\text{к}}$:

$$V = (1{,}10...1{,}15)V_{\text{к}} \approx 0{,}3h\left(D^2 + d^2 + Dd\right), \qquad (11.24)$$

где D и d – соответственно большее и меньшее основания усеченного конуса; h – его высота.

11.5.5. Расчет количества операций

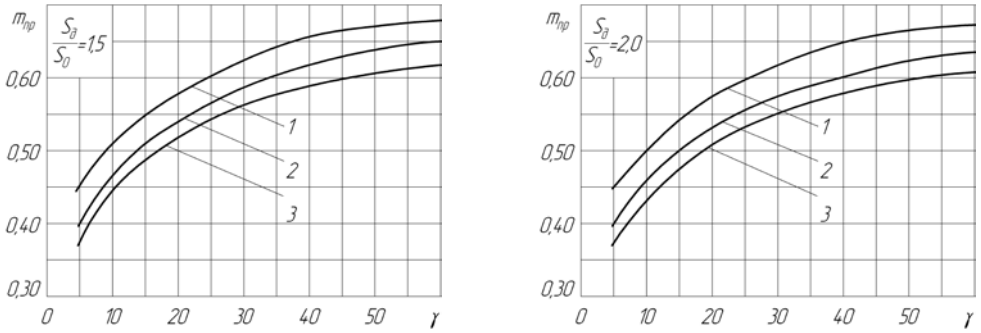
Исходные данные:

- относительный радиус кривизны оживальной части оболочки $\gamma = 2R_{\text{н}}/D$;
- итоговый коэффициент обжима с учетом принудительного утонения стенки ($m_{\Sigma} = \left(d_{\text{в}} + 2 \cdot S\right)/D = d_n / D_o$);
- итоговый коэффициент обжима без учета принудительного утонения стенки ($M_{\Sigma} = \left(d_{\text{в}} + 2 \cdot S_0^{\text{д}}\right)/D = d_n / D_o$);
- материал оболочки и его механические свойства.

Чтобы определить количество операций, необходимо последовательно проверить возможность изготовления оживального профиля оболочки за одну, две и большее число операций, исходя из условия прочности заготовки при принятом оптимальном характере изменения радиусов кривизны по операциям.

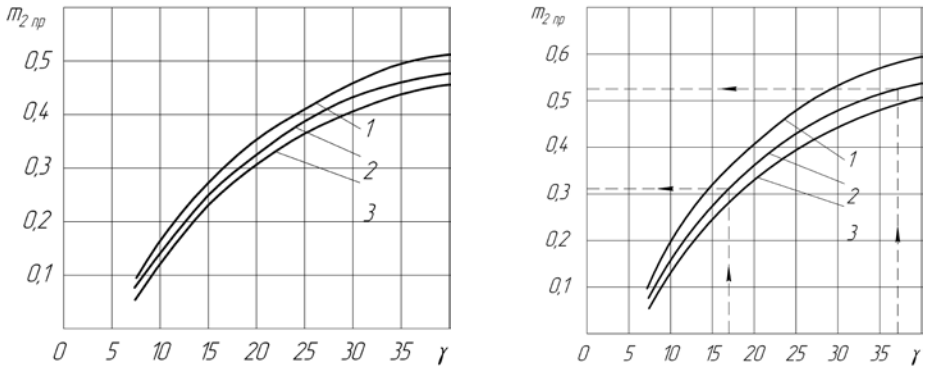
Возможность изготовления оболочки за одну операцию оценивается следующим образом. По заданному значению $\gamma = 2R_{\text{н}}/D$ определяют по графику $m_{\text{пр1}}$ (рис. 11.7) и сравнивают его с m_{Σ}. Если $m_{\Sigma} > m_{\text{пр1}}$, то фигуру головной части можно изготовить за одну операцию. Если же условие не выполняется, то необходимо проверить возможность изготовления фигуры за две операции, принимая $\Delta\gamma$ = 15...25. Необходимо учитывать, что с уменьшением $\Delta\gamma$

предельное значение коэффициента обжима увеличивается. Если $m_{\Sigma} > m_{пр2}$, то фигура оживальной части оболочки может быть изготовлена за две операции (рис. 11.8).



а *б*

Рис. 11.7. Зависимость предельных коэффициентов «обжима» на 1-й операции от радиусов кривизны оживальной части оболочек при бесступенчатом способе формообразования (*а* – сталь 11кп, *б* – биметал-3): *1* – r/S_0=1,0; *2* – r/S_0=1,5; *3* – r/S_0=2,0



а *б*

Рис. 11.8. Зависимость предельных коэффициентов «обжима» за две операции от радиусов кривизны оживальной части оболочек при бесступенчатом способе формообразования (*а* – сталь 11кп, *б* – Бим-3): *1* – Δγ=15; *2* – Δγ=20; *3* – Δγ=25

Тогда для первой операции можно записать:

$$\gamma_1 = \gamma + \Delta\gamma\,; \qquad (11.25)$$

$$R_{н1} = R_н + 0{,}5\Delta\gamma \cdot D\,; \qquad (11.26)$$

$$m_1 = (1{,}02...1{,}05)m_{пр1}\,. \qquad (11.27)$$

Для второй

$$R_{н2} = R_н, \tag{11.28}$$

$$\gamma_2 = \gamma. \tag{11.29}$$

По аналогии оценивается возможность формообразования оболочки за три операции (предельные значения коэффициентов определяются по графикам рис. 11.9). При этом относительные радиусы кривизны определяют, пользуясь соотношениями

$$\frac{R_{н1}}{R_З} = \frac{R_{н2}}{R_З} + (30...50); \quad \frac{R_{н2}}{R_З} = \frac{R_{н3}}{R_З} + (15...25); \quad \frac{R_{н3}}{R_З} = \frac{R_н}{R_З},$$

где $R_З = D/2$.

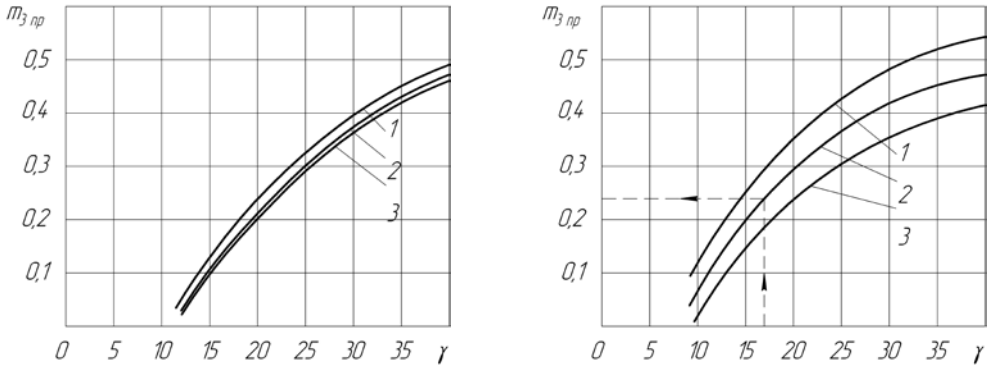


Рис. 11.9. Зависимость предельных коэффициентов «обжима» за три операции от радиусов кривизны оживальной части оболочек при бесступенчатом способе формообразования (*а* – сталь 11кп, *б* – Бим-3): *1* – Δγ=15; *2* – Δγ=20; *3* – Δγ=25

При применении способа ступенчатого формообразования оболочек предельные значения коэффициентов $m_{пр1}$, $m_{пр2}$ назначают из рис. 11.10 и 11.11.

Чтобы оценить правильность определения количества операций после установления радиусов кривизны и коэффициентов обжима, необходимо проверить заготовку на прочность в опасном сечении на каждой операции по условию

$$\sigma_{max} < [\sigma], \tag{11.30}$$

где σ_{max} – максимальные напряжения, действующие в опасном сечении: $\sigma_{max} = \sigma_{\rho max}$ при бесступенчатом обжиме и на второй операции ступенчатого обжима, $\sigma_{max} = \sigma_{z1max}$ на первой операции ступенчатого обжима; $[\sigma]$ – допустимые растягивающие напряжения для опасного сечения заготовки.

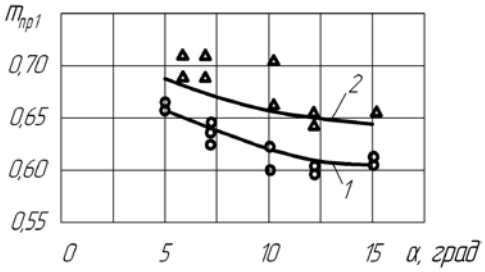


Рис. 11.10. Зависимость $m_{пр1}$ от угла конусности матрицы α на первой операции ступенчатого способа вытяжки-раздачи: *1* – биметалл-3; *2* – сталь 11кп

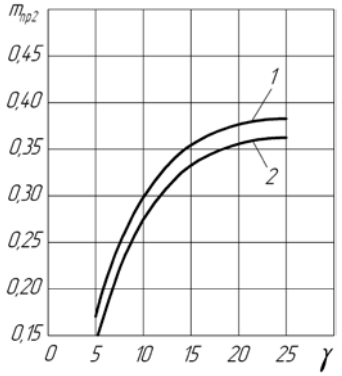


Рис. 11.11. Область допустимой деформации на второй операции ступенчатого способа вытяжки-раздачи: *1* – биметалл-3; *2* – сталь 11кп

Действующие напряжения рассчитываются по следующим формулам:

$$\sigma_{\rho\max} = \frac{A\cdot\sigma_{ii}}{\cos\alpha-\beta}\left[\frac{K_i\cdot\alpha_i-1}{K_i^2+1}+\frac{\mu_i}{K_i}e^{K_i(\omega_i-\alpha_i)}\cdot\left(\frac{2-e^{-K_i\omega_i}}{K_i}\cdot\mu+\right.\right.$$
$$\left.\left.+\frac{2\cdot K_i\cdot\omega_i-2+e^{-K_i\omega_i}}{K_i^2+1}\right)\right], \qquad (11.31)$$

где A=1 – для первой операции бесступенчатого обжима; A=1,32 – для последующих операций бесступенчатого и для второй операции ступенчатого обжима;

$$\sigma_{i1} = \sigma_{iy}\left(\frac{\ln\dfrac{1}{M_1}}{2\varepsilon_{iy}}\right)^{\varepsilon_y} \qquad (11.32)$$

– интенсивность напряженного состояния в зоне очага деформации на первой операции бесступенчатого обжима;

$$\sigma_{ii} = \sigma_y\left(\frac{\ln\dfrac{S_o^д}{m_i\cdot S}}{2\varepsilon_{iy}}\right)^{\varepsilon_{iy}} \qquad (11.33)$$

– интенсивность напряженного состояния в зоне очага деформации на последующей (*i*-й) операции бесступенчатого и на второй операции ступенчатого обжима;

$$\alpha_i = \frac{1}{\gamma_i}\sqrt{\gamma_i^2 - (\gamma_i - 1 + M_i)^2}\ ; \qquad (11.34)$$

$$\beta_i = \gamma_i - 1/\gamma_i\ ; \qquad (11.35)$$

$$K_i = f \cdot (\gamma_i + 1), \qquad (11.36)$$

где f – коэффициент трения (для биметаллических и латунированных заготовок $f = 0{,}10$); $\omega_1 = 0$ – для первой операции бесступенчатого обжима.

Для последующих операций бесступенчатого и второй операции ступенчатого обжима:

$$\omega_i = \frac{1}{\gamma_i}\sqrt{\gamma_i^2 - (\gamma_i - 1 + C_i)^2}\ ; \qquad (11.37)$$

$$C_i = X - \gamma_{i-1} + 1; \qquad (11.38)$$

$$X = \frac{\gamma_{i-1} \cdot b^2}{h^2 + b^2}; \qquad (11.39)$$

$$b = \gamma_{i-1} - \gamma_i\ ; \qquad (11.40)$$

$$h = \lambda - \gamma - \eta + \alpha\ ; \qquad (11.41)$$

$$\alpha = \sqrt{\gamma_i^2 - (\gamma_i - 1 + M_{\Sigma i})^2}\ ; \qquad (11.42)$$

$$\lambda = \sqrt{\gamma_{i-1}^2 - (\gamma_{i-1} - 1 + m_{\Sigma i-1})^2}\ ; \qquad (11.43)$$

$$\gamma = \sqrt{\gamma_i^2 - (\gamma_i - 1 + m_{i-1})^2}\ ; \qquad (11.44)$$

$$\eta = \sqrt{\gamma_i^2 - (\gamma_i - 1 + m_{\Sigma i})^2}\ ; \qquad (11.45)$$

$$\sigma_{z1\max} = 1{,}15\sigma_i\left\{\left[1 + \frac{\mu}{\sin\alpha}\cdot\left(1 - \frac{\sigma_\rho}{1{,}15\cdot\sigma_i}\right) - \frac{\mu}{\sin\alpha}\cdot\frac{\ln l}{m_S}\right]\cdot\frac{\ln l}{m_S} + \frac{\sigma_\rho}{1{,}15\cdot\sigma_i} + \frac{\sin\alpha}{2}\right\}, \qquad (11.46)$$

где $\sigma_i = \sigma_в\left(\frac{1 - m_i \cdot m_s}{\psi_y}\right)^{1-\psi_y}$ – для отожженных заготовок; $m_1 = d_1^н / D_o$ – коэффициент обжима на первой операции ступенчатого обжима; $m_S = S_1^н / S_д$ – коэффициент утонения придонного участка заготовки; $d_1^н$, $S_1^н$ – соответственно диаметр и толщина стенки полуфабриката после первой операции ступенчатого обжима; α – угол конусности матрицы на первой вытяжной операции ступенчатого обжима.

Допустимые напряжения могут быть определены по формуле

$$[\sigma] = B\left[\sigma_{iy} + \frac{\sigma_{i\rho} - \sigma_{iy}}{\varepsilon_{i\rho} - \varepsilon_{iy}}\left(0{,}58 \cdot \varepsilon_{i\rho} - \varepsilon_{iy}\right)\right], \qquad (11.47)$$

где $B = r/(r+0{,}5 \cdot S^{н})$ – для первых операций по обеим схемам обжима; B=1 – для последующих операций; $\sigma_{i\rho}$ – меридиональные напряжения, действующие в конце первого этапа обжима:

$$\sigma_{\rho} = 1{,}15\sigma_{i1}\left[\left(1 + \mu/\mathrm{tg}\alpha\right) \cdot \ln\left(1/m_1\right) + 0{,}66 \cdot \sin\alpha \cdot \sqrt{S_{д}/D_o}\right]; \qquad (11.48)$$

$$\sigma_{i1} = \sigma_{в}\left(\left(1 - m_1\right)/\psi_{y}\right)^{1-\psi_{y}}. \qquad (11.49)$$

При невыполнении условия (11.30) оценивается возможность формообразования за три и более операций.

11.5.6. Расчет размеров заготовок на промежуточных операциях

Исходные данные:

- размеры исходного полуфабриката (D_o, $S_o^{н}$, $S_o^{д}$, H_o, r_o);
- количество операций n;
- коэффициенты обжима по операциям (m_1, m_2, …, m_n);
- наружные радиусы кривизны по операциям ($R_{н1}$, $R_{н2}$, …, $R_{нn}$.).

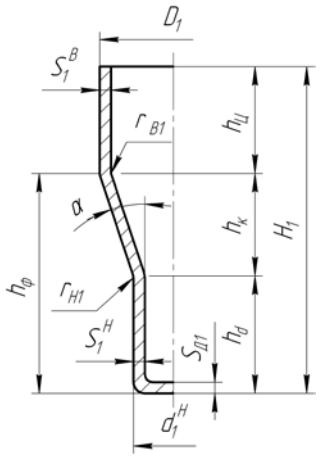


Рис. 11.12. Полуфабрикат первой операции ступенчатого «обжима»

Расчетные размеры полуфабрикатов по операциям:

- диаметры в расчетных сечениях (D_i, d_i);
- толщины стенок в расчетных сечениях ($S_i^{в}$, $S_i^{н}$, $S_i^{с}$);
- толщина вершины $S_{вi}$;
- высоты h_i, H_i;
- радиусы сопряжения r_i.

Последовательность расчета и расчетные формулы для определения размеров полуфабрикатов по операциям приведены в табл. 11.5, 11.6, эскизы полуфабрикатов – на рис. 11.4, 11.5, 11.12.

Таблица 11.5

Расчет размеров полуфабрикатов на операциях бесступенчатого «обжима»

Определяемая величина	Расчетная формула
Наружный диаметр полуфабриката в верхнем $D_i^{в}$ и среднем $D_i^{с}$ расчетных сечениях на i-й операции	Принимается равным на всех операциях $D_i^{в} = D_i^{с} = D_о = D$
Наружный диаметр исходного цилиндрического полуфабриката $D_о$	Принимается равным минимальному наружному диаметру цилиндрической части готовой оболочки по чертежу
Наружный диаметр полуфабриката в нижнем расчетном сечении: на первой операции $d_1^{н}$; на промежуточной i-й $d_i^{н}$; на последней (n-й) $d_n^{н}$	 $d_1^{н} = m_1 \cdot D_о$; $d_i^{н} = m_{\Sigma i} \cdot D_о$; $d_n^{н} = m_{\Sigma n} \cdot D_о$
Итоговые коэффициенты обжима по операциям $m_1, m_{\Sigma 2}, \ldots, m_{\Sigma n}$	Назначаются по рекомендациям п. *11.5.5*
Наружные радиусы кривизны оживальной части полуфабриката по операциям $R_{н1}, R_{н2}, \ldots, R_{нп}$	Определяются по рекомендациям п. *11.5.5*
Высота оживальной части полуфабриката (расстояние между средним и нижним расчетными сечениями): на первой операции h_1; на промежуточной h_i; на последней h_n	$h_1 = \sqrt{R_{н1}^2 - [R_{н1} - 0{,}5(D_o - d_1^{н})]^2}$ $h_i = \sqrt{R_{нi}^2 - [R_{нi} - 0{,}5(D_o - d_i^{н})]^2}$ $h_n = h$
Толщина стенки в верхнем $S_i^{в}$ и среднем $S_i^{с}$ расчетных сечениях	$S_i^{в} = S_i^{с} = S_о^{в}$ толщина стенки принимается одинаковой на всех операциях
Толщина стенки в нижнем $S_i^{н}$ расчетном сечении	$S_i^{н} = S_о^{н}$ толщина стенки принимается одинаковой на всех операциях
Внутренний радиус оживальной части полуфабриката на последней (n-й) операции $R_{вп}$	$R_{вп} = R_в$ назначается по чертежу готовой оболочки
Внутренний радиус сопряжения оживальной части и вершины заготовки: на промежуточных операциях r_i; на последней (n-й) операции r_n	 $r_i = (1{,}0 \ldots 1{,}5) \cdot S_о^{в}$ $r_n = r$
Высота вершины: на промежуточных операциях $h_{вi}$ на последней (n-й) операции $h_{вп}$	 $h_{вi} = h_i^{н} + S_{вi}$; $h_{вп} = h_в = h_n + S_{вп}$
Расстояние от нижнего расчетного сечения до внутренней поверхности вершины полуфабриката: на промежуточных операциях $h_i^{н}$; на последней (n-й) операции $h_n^{н}$	$h_i^{н} = r_i(1 - \sin\alpha_1)$; $h_n^{н} = r_n(1 - \sin\alpha_n) = h^{н}$; $\alpha_1, \alpha_{2, \ldots,} \alpha$ определяют по рекомендациям п. *11.5.5*
Толщина вершины: на промежуточных операциях $S_{вi}$; на последней (n-й) операции $S_{вп}$	 $S_{вi} = S_д$; $S_{вп} = S_в$
Высота цилиндрической части заготовки: на промежуточных операциях $h_{цi}$; на последней (n-й) операции $h_{цп}$	$h_{цi} = (H_о - S_д) + S_д(D - S_о^{в})/4\, S_о^{в} - -V_{ожi}/\pi \cdot (D - S_о^{в}) S_о^{в}$; $h_{цп} = (1{,}25 \ldots 1{,}30) h_ц$
Объем оживальной части заготовки: на промежуточных операциях $V_{ожi}$	Определяют в соответствии с рекомендациями п. *11.5.4*
Полная высота заготовки: на промежуточных операциях H_i; на последней (n-й) операции H_n	$H_i = h_{цi} + h_i + h_{вi}$; $H_n = h_{цп} + h_n + h_{вп}$

Таблица 11.6

Расчет размеров полуфабрикатов на первой операции ступенчатого «обжима»

Определяемая величина	Расчетная формула
Наружный диаметр полуфабриката в верхнем расчетном сечении D_1	$D_1 = D_о$
Наружный диаметр исходного цилиндрического полуфабриката $D_о$	Принимается равным минимальному наружному диаметру цилиндрической части оболочки по чертежу D
Наружный диаметр полуфабриката в нижнем расчетном сечении d_1	$d_1 = m_1 D_1$
Коэффициент «обжима» на первой операции m_1	Определяется в соответствии с рекомендациями п. *11.5.5*
Высота нижней цилиндрической части полуфабриката h_d	$h_d = h_ф - h_к$
Высота фигурной части полуфабриката $h_ф$	$h_ф = (0{,}9…1{,}0)h$
Высота оживальной части готовой оболочки h	Назначается по чертежу готовой оболочки
Высота конической части полуфабриката $h_к$	$h_к = D_1 - d_1/2\mathrm{tg}\alpha$
Угол конусности α	α=5…12°
Высота верхней цилиндрической части полуфабриката $h_ц$	$h_ц = H_о\, m_1^2\, h_ф - 0{,}33 h_к(1+ m_1^2)$
Полная высота полуфабриката H_1	$H_1 = h_ц + h_ф$
Высота исходного полуфабриката $H_о$	Определяется в соответствии с рекомендациями п. *4.5.4*
Толщина стенки в верхнем расчетном сечении $S_1^в$	$S_1^в = S_о^в$
Толщина стенки в нижнем расчетном сечении $S_1^н$	$S_1^н = S_о^н$
Толщина дна $S_1^д$	$S_1^д = S_о^д$
Радиусы сопряжения конической и цилиндрической частей $r_{в1}$, $r_{н1}$	$r_{в1} = r_{н1} = (10…12)S_о^в$
Размеры $S_о^в$, $S_о^н$, $S_о^д$	Определяются в соответствии с рекомендациями п. *11.5.4*

11.5.7. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента

Исходные данные:

- чертеж готовой оболочки;
- размеры полуфабрикатов на операциях;
- коэффициенты обжима на операциях.

Расчетные исполнительные размеры рабочего инструмента:

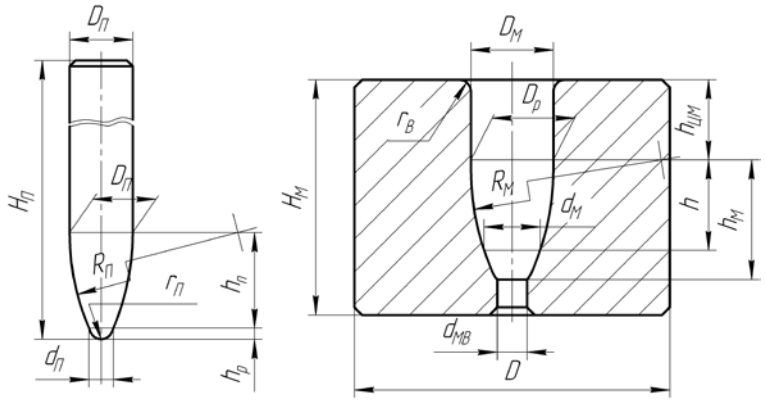
- диаметры матриц в расчетных сечениях ($D_{мi}$, $d_{мi}$);
- высота цилиндрической части матрицы $h_{цмi}$;
- высота оживальной части матрицы $h_{мi}$;
- радиус кривизны оживальной части матриц $R_{мi}$;
- диаметры пуансонов в расчетных сечениях $D_{пi}$;
- высота оживальной части пуансона $h_{пi}$;

• высота вершины пуансона h_{pi};

• радиус кривизны оживальной части пуансона $R_{пi}$;

• радиус закругления кромки пуансона $r_{пi}$.

Размеры рабочего инструмента рекомендуется рассчитывать сначала для последней операции, а затем для промежуточных операций. Размеры инструмента на последней операции (рис. 11.13) назначаются по номинальным размерам конечного полуфабриката (детали) с учетом допусков на его изготовление, степени и направления износа рабочего инструмента, а также распружинивания заготовки после снятия нагрузки.



а *б*

Рис. 11.13. Эскизы рабочего инструмента: *а* – пуансон, *б* – матрица

Последовательность расчета и расчетные формулы приведены в табл. 11.7.

Исполнительные размеры рабочего инструмента на промежуточных операциях рассчитываются по номинальным размерам полуфабрикатов с учетом соответствующих допусков. Припуск на износ инструмента и распружинивание заготовок, как правило, не учитывается.

Т а б л и ц а 11.7

Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента на последнем «обжиме»

Определяемая величина	Расчетная формула
1	2
Диаметр заходной части матрицы $D_{мп}$	$D_{мп}=[D+(1…2)\,\Delta_D]^{+\delta м}$
Наружный диаметр цилиндрической части готовой оболочки D	Назначается по чертежу готовой оболочки
Допуск на наружный диаметр цилиндрической части оболочки Δ_D	Назначается по чертежу готовой оболочки
Допуск на изготовление рабочей полости матрицы $\delta_м$	Назначается по 7–9-му квалитету
Диаметр матрицы в верхнем расчетном сечении $D_{мп}$	$D_{мп}=(D-П_и)^{+\delta м}$
Диаметр матрицы в нижнем расчетном сечении $d_{мп}$	$d_{мп}=(d_{впmax}-П_и-\delta_у)^{+\delta м}$
Максимальный наружный диаметр вершины полуфабриката $d_{впmax}$	$d_{впmax}= d_{вп}-\Delta_1$

Окончание табл. 11.7

1	2
Номинальный наружный диаметр вершины полуфабриката $d_{вп}$	Назначается по чертежу готовой оболочки
Припуск на износ $П_и$	$П_и=(0,1…0,2)П_д$
Поле допуска $П_д$	$П_д=\Delta_1-\Delta_2$
Верхнее Δ_1 и нижнее Δ_2 отклонения на размер	Назначается по чертежу готовой оболочки
Величина распружинивания заготовки в нижнем расчетном сечении $\delta_у$	$\delta_у=0,01d_{вп}$
Радиус кривизны оживальной части матрицы $R_{мп}$	$R_{мп}= R_{нп}$
Наружный радиус кривизны оживальной части конечного полуфабриката $R_{нп}$	Назначается по чертежу готовой оболочки
Высота оживальной части матрицы $h_{мп}$	$h_{мп}= h_п - h_в$
Высота оживальной части полуфабриката $h_п$	Назначается по чертежу готовой оболочки
Высота части вершины оболочки, соответствующей диаметру $d_в$, $h_в^н$	Назначается по чертежу готовой оболочки
Высота цилиндрической части матрицы $(h_{цм})_п$	$(h_{цм})_п=(0,6…0,8)D$
Радиус закругления входной кромки матрицы $r_{вп}$	$r_{вп}=(2…4)S_o^в$
Диаметр пуансона в верхнем расчетном сечении $D_{пп}$	$D_{пп}=(D\text{-}2S_o^в+П_и)_{-\delta п}$
Припуск на износ $П_и$	$П_и=(0,1…0,2)П_д$
Поле допуска $П_д$	$П_д=\Delta_1\text{-}\Delta_2$
Верхнее Δ_1 и нижнее Δ_2 отклонения на диаметр оболочки	Назначается по чертежу готовой оболочки
Допуск на изготовление пуансона $\delta_п$	Назначается по 7–9-му квалитету
Диаметр пуансона в нижнем расчетном сечении $d_{пп}$	$d_{пп}=(d_{кп\min}+ П_и+\delta_у)_{-\delta п}$
Минимальный внутренний диаметр оболочки в нижнем расчетном сечении $d_{кп\min}$	$d_{кп\min}=d_к+\Delta_2$
Нижнее отклонение на внутренний диаметр в нижнем расчетном сечении Δ_2	Назначается по чертежу готовой оболочки
Величина распружинивания $\delta_у$	$\delta_у=0,01d_к$
Допуск на диаметральный размер пуансона в нижнем расчетном сечении $\delta_п$	Назначается по 7–9-му квалитету
Высота оживальной части пуансона $h_{пп}$	$h_{пп}=\sqrt{R_в^2-[R_в-0,5\cdot(D_{пп}-d_{пп})]^2}$
Радиус кривизны оживальной части пуансона $R_{пп}$	$R_{пп}=R_в$
Внутренний радиус кривизны оживальной части оболочки $R_в$	Назначается по чертежу готовой оболочки
Высота вершины пуансона $h_{пп}$	$h_{пп}= r_{пп}\,(1- h_{пп}/R)$
Радиус закругления кромки пуансона $r_{пп}$	$r_{пп}= r$
Внутренний радиус закругления вершины оболочки r	Назначается по чертежу готовой оболочки

Последовательность расчета и формулы для определения исполнительных размеров рабочего инструмента на промежуточных операциях обжима приведены в табл. 11.8, 11.9, эскизы рабочего инструмента для первой операции ступенчатого обжима – на рис. 11.14.

Таблица 11.8

Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента на промежуточных операциях бесступенчатого «обжима»

Определяемая величина	Расчетная формула
Диаметр цилиндрической части матрицы $D_{мi}$	$D_{мi}=D_{рi}=[D+(1\ldots2)\Delta_D]^{+\delta м}$
Высота цилиндрической части матрицы $(h_{цм})_i$	$(h_{цм})_I=(0{,}6\ldots0{,}8)D$
Диаметр матрицы в нижнем расчетном сечении $d_{мi}$	$d_{мi}=(d_i^{н})^{+\delta м}$
Минимальный наружный диаметр полуфабриката в нижнем расчетном сечении $d_i^{н}$	См. табл. 11.5
Допуск на изготовление матрицы $\delta_м$	Назначается по 7–9-му квалитету
Высота оживальной части матрицы $h_{мi}$	$h_{мi}= h_i+1{,}2\cdot h_{вi}$
Высота оживальной части полуфабриката h_i	См. табл. 11.5
Высота вершины полуфабриката $h_{вi}$	См. табл. 11.5
Диаметр отверстия под выталкиватель $(d_{мв})_i$	$(d_{мв})_i = 2*[\sqrt{R_{мi}^2 - h_{мi}^2} - (R_{мi} - D/2)]$
Радиус кривизны оживальной части матрицы $R_{мi}$	$R_{мi}= R_{нi}$
Наружный радиус кривизны оживальной части полуфабриката $R_{нi}$	См. табл. 11.5
Радиус закругления входной кромки матрицы $r_{вi}$	$r_{вi}=(2\ldots4)S_o^{в}$
Диаметр пуансона в верхнем расчетном сечении $D_{пi}$	$D_{пi}=(D-2S_{min})_{-\delta п}$
Минимальная толщина цилиндрической части полуфабриката S_{min}	$S_{min}= S_o^{в}-\Delta_2$
Нижнее отклонение на толщину цилиндрической части полуфабриката Δ_2	Назначается по чертежу готовой оболочки
Диаметр пуансона в нижнем расчетном сечении $d_{пi}$	$D_{пi}=(d_i^{н}-2S_i^{н})_{-\delta п}$
Номинальный наружный диаметр полуфабриката в нижнем расчетном сечении d_i	См. табл. 11.5
Толщина стенки полуфабриката в нижнем расчетном сечении $S_i^{н}$	См. табл. 11.5
Радиус кривизны оживальной части пуансона $R_{пi}$	$R_{пi}=R_{мi}+0{,}2\cdot D$
Радиус закругления кромки пуансона $r_{пi}$	$r_{пi}= r_i$
Внутренний радиус сопряжения оживальной части и вершины полуфабриката r_i	См. табл. 11.5

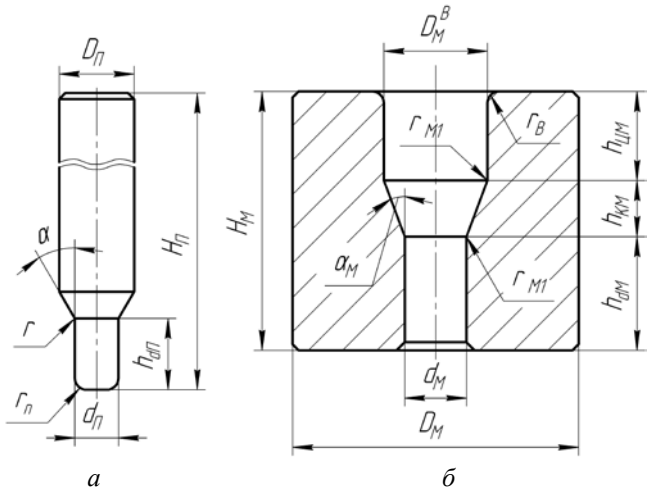
Таблица 11.9

Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента на промежуточных операциях ступенчатого обжима

Определяемая величина	Расчетная формула
1	2
Диаметр цилиндрической части матрицы $D_м^{в}$	$D_м^{в}=[D_1+(1\ldots2)\Delta_D]^{+\delta м}$
Наружный диаметр полуфабриката в верхнем сечении D_1	См. табл. 11.6
Допуск на наружный диаметр цилиндрической части оболочки Δ_D	Назначается по чертежу готовой оболочки
Диаметр нижней цилиндрической части матрицы $d_м$	$d_м=(d_1^{н})^{+\delta м}$
Номинальный диаметр нижней части полуфабриката на первой операции $d_1^{н}$	См. табл. 11.6

Окончание табл. 11.9

1	2
Допуск на изготовление матрицы $\delta_м$	Назначается по 7–9-му квалитету
Высота верхней цилиндрической части матрицы $h_{цм}$	$h_{цм}=(0,6…0,8)D_о$
Наружный диаметр исходного цилиндрического полуфабриката $D_о$	См. табл. 11.6
Высота нижней цилиндрической части матрицы $h_{dм}$	$h_{dм}= h_d+0,5h_1^н$
Высота нижней цилиндрической части полуфабриката h_d	См. табл. 11.6
Высота конусной части матрицы $h_{км}$	$h_{км} = D_м^в – d_м/2tg\alpha_м$
Угол конусности матрицы	$\alpha_м=\alpha$
Угол конусности переходной части полуфабриката α	См. табл.11.6
Радиус закругления входной кромки матрицы $r_в$	$r_в=(2…4)S_о^в$
Толщина стенки исходного полуфабриката в верхнем расчетном сечении $S_о^в$	См. табл. 11.6
Радиусы сопряжения конической и цилиндрической частей матрицы $r_{м1}$, $r_{м2}$	$r_{м1}= r_{м2}=(1,0…1,2)S_о^в$
Диаметр пуансона в верхнем расчетном сечении $D_п$	$D_п=(D_м^в–2S_о^в)_{-\delta п}$
Диаметр пуансона в нижнем расчетном сечении $d_п$	$d_п=(d_м–2S_1^н)_{-\delta п}$
Допуск на изготовление пуансона $\delta_п$	Назначается по 7–9-му квалитету
Толщина стенки полуфабриката первого «обжима» в нижнем расчетном сечении $S_1^н$	См. табл. 11.6
Высота цилиндрической части пуансона $h_{dп}$	$h_{dп}= h_{цм} + 0,5d_м$
Угол конусности переходной части пуансона $\alpha_п$	$\alpha_п=30…45°$
Радиус сопряжения цилиндрической и конической частей пуансона $r_п$	$r_п = r_м$
Радиус закругления кромки пуансона $r_п$	$r_п=(1,5…2,0)\ S_о^в$



а *б*

Рис. 11.14. Эскизы рабочего инструмента на первой операции ступенчатого «обжима»: *а* – пуансон; *б* – матрица

11.5.8. Расчет технологических усилий

Для операций бесступенчатого обжима максимальное технологическое усилие определяется по формуле

$$P_{i\max} = P_i + \Delta P_i\,, \tag{11.50}$$

где P_i – усилие, затрачиваемое на принудительное утонение стенки полуфабриката на второй стадии обжима; ΔP_i – усилие деформирования донной части полуфабриката

$$P_i = \frac{\pi\cdot\sigma_{ii}\cdot B_i}{B_i-1}\cdot\left\{d_{ai}^{B_i-1}\cdot B_i\cdot\left[\frac{d_{ai}^{3-B_i}-d_i^{3-B_i}}{2\cdot(3-B_i)}-\frac{S_i}{2}\cdot\frac{d_{ai}^{2-B_i}-d_i^{2-B_i}}{2-B_i}\right]-\right.$$
$$\left.-\frac{(d_{ai}-2\cdot S_i)^2-(d_i-2\cdot S_i)^2}{4}\right., \tag{11.51}$$

где $\sigma_{ii}=1{,}15\cdot\cos 2\varphi_i\cdot\sigma_{iy}\cdot\left(\frac{\ln\left(S_o^{д}/m_i\cdot S_i\right)}{2\cdot\varepsilon_{iy}}\right)^{\varepsilon_{iy}}$; S_i – толщина стенки оживальной части полуфабриката; d_i – диаметр нижнего расчетного сечения полуфабриката после обжима;

$$B_i = 1/\cos\varphi_i + \mu/\sin\varphi_i\,;\quad d_{\alpha i} = D - 2R_{mi}(1-\cos\alpha_{\alpha i});$$
$$\alpha_{\alpha i} = \sin\alpha_i - \frac{1}{\gamma_i}\left(1{,}5-0{,}5m_i-m_i^2\right);\quad \alpha_i = \frac{1}{\gamma_i}\sqrt{\gamma_i^2-(\gamma_i-1-m_i)^2}\,;$$
$$\varphi_i = (\alpha_i+\alpha_{\alpha i})/2\,;$$
$$\Delta P_i = \pi\cdot d_i\cdot S_{д}\cdot\sigma_{в}\cdot tg(\alpha_i+\mu). \tag{11.52}$$

Величина удельного усилия, действующего на рабочий инструмент в конце процесса обжима, может быть рассчитана по формуле

$$p_i = \frac{\sigma_{ii}}{B_i-1}\cdot\left[B_i\cdot\left(\frac{d_{ai}}{d_i}\right)^{B_i-1}-1\right]. \tag{11.53}$$

Библиографический список

1. *Агеев Н.П.,* Данилин Г.А., Огородников В.П. Вытяжка в штампах полых тонкостенных деталей машино- и приборостроения. В 2 ч. Ч. 1. Механические основы процесса вытяжки. Тверь: ГЕРС, 1997. 336 с.

2. *Агеев Н.П.,* Данилин Г.А., Огородников В.П. Вытяжка в штампах полых тонкостенных деталей машино- и приборостроения. В 2 ч. Ч. 2. Проектирование технологических процессов. Тверь: ГЕРС, 1998. 257 с.

Справочник по технологии патронного производства

В двух томах

Том 1

Редактор *Г.М. Звягина*
Корректор *Л.А. Петрова*
Компьютерный набор *В.А. Игнатенко*
Компьютерная верстка *С.В. Кашуба*

Подписано в печать 28.01.2011. Формат бумаги 70х100/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 51,775 . Тираж 200 экз. Заказ № 262.
Балтийский государственный технический университет
190005, С.-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1

Типография «СОТ»
198097, С.-Петербург, ул. Трефолева д. 2