Н.П.АГЕЕВ, Г.А.ДАНИЛИН, В.П.ОГОРОДНИКОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПАТРОНОВ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

Часть 1

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПАТРОНОВ

Допущено
УМО по университетскому политехническому образованию
в качестве учебника для студентов вузов,
обучающихся по специальности 170104
"Высокоэнергетические устройства автоматических систем"

Санкт-Петербург
2005

Авторы: *Н.П. Агеев*, канд. техн. наук, проф; *Г.А. Данилин*, д-р техн. наук, проф; *В.П. Огородников*, канд. техн. наук

УДК 623.455.2/.6.001.63(075.8)
А18

Агеев, Н.П.

А18 Технология производства патронов стрелкового оружия. Ч. 1. Технологические основы проектирования патронов / Н.П. Агеев, Г.А. Данилин, В.П. Огородников; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2005. – 352 с.

ISBN 5-85546-170-X

Рассмотрена технологическая классификация металлических элементов патронов, изложены физико-механические основы комплексной технологии, учитывающей совместное влияние на свойства металлов пластической деформации и термической обработки; применяемые металлические конструкционные материалы, модели формирования механических и технологических свойств, классификация процессов холодной штамповки и особенности технологии заготовительного производства.

Предназначен для студентов вузов, обучающихся по специальности «Высокоэнергетические устройства автоматических систем». Может быть полезен студентам, аспирантам, обучающимся по специальностям, связанным с обработкой металлов давлением, а также инженерам-технологам и конструкторам патронного и холодноштамповочного производства.

УДК 623.455.2/.6.001.63(075.8)

Рецензенты: заслуженный деятель науки и техники РФ, д-р техн. наук, проф. *Н.А. Усенко*, главный инженер ФГУП "ПО Ульяновский машиностроительный завод" *Б.Р.Гринберг*

ISBN 5-85546-170-X

© Авторы, 2005
© БГТУ, 2005

ПРЕДИСЛОВИЕ

В основу предлагаемой книги положен курс лекций, читаемый авторами в течение 40 лет на кафедре «Высокоэнергетические устройства автоматических систем» Балтийского государственного технического университета «Военмех».

Содержание пособия соответствует программе дисциплины «Технология производства выстрелов». Ее теоретической базой служат дисциплины «Теория пластичности» и «Теория обработки металлов давлением». Эксплуатационные требования к патронам и гильзам определены положениями дисциплины «Проектирование выстрелов». Физические основы других методов обработки, реализуемых в комплексной технологии изготовления металлических элементов выстрелов, излагаются в следующих дисциплинах: «Материаловедение», «Технология конструкционных материалов».

Учебное пособие состоит из трех частей, охватывающих следующий круг вопросов: технологические основы проектирования и обеспечения качества патронов с использованием физико-механических закономерностей комплексной технологии и понятий о технологичности конструкций изделий; механические основы процессов штамповки, применяемых для изготовления металлических элементов; физико-химические основы термической и химической обработки, формирующих, в сочетании с процессами штамповки, механические свойства металла деталей и свойства их поверхностей; методические основы проектирования комплексных технологических процессов изготовления металлических элементов патронов.

В рамках ограниченного по объему пособия невозможно детально рассмотреть все аспекты технологии и методики ее проектирования. Поэтому внимание уделено основным, наиболее значимым в технологии производства процессам штамповки, термообработки, химической обработки. Для углубленного изучения этой дисциплины приведены дополнительные методические рекомендации.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

R – радиус;

θ – полярный угол в плоскости меридиана;

φ – угол в плоскости параллельного круга;

r – расстояние от оси симметрии до некоторой точки срединной поверхности;

S – толщина стенки детали;

R_ρ – радиус кривизны оболочки в меридиональном сечении;

R_θ – радиус кривизны оболочки в окружном направлении;

S/d – относительная толщина стенки детали;

S/R_ρ – относительная толщина стенки оболочки;

H – высота детали;

D – максимальный наружный диаметр детали;

F – площадь поверхности детали (элемента детали);

δ_S – относительная разнотолщинность (разностенность);

D_0, S_0 – диаметр и толщина исходной заготовки;

ρ – радиус сечения;

$\bar{\rho} = \dfrac{\rho/d_п}{2}$ – относительный радиус пуансона;

$\rho^{о.с.}$, $\rho^{гр}$ – относительные радиусы опасного и граничного сечения;

h_i – ход инструмента;

$h_i = h_i/d_п$ – относительный ход инструмента;

$d_м$, $d_п$ – диаметры рабочей части матрицы и пуансона;

z – односторонний технологический зазор между пуансоном и матрицей;

$П_и$ – припуск на износ инструмента;

$П_д = T^в - T^н$ – поле допуска;

$T^в_д, T^н_д$ – верхнее и нижнее допускаемое отклонение на размер детали;

$T_м, T_п$ – допускаемые отклонения на размеры инструмента;

m_1, m_i – коэффициенты вытяжки на 1-й и i-й операциях;

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

ε_i – интенсивность деформации;

$\dot{\varepsilon}_i$ – интенсивность скорости деформации;

$\varepsilon_{iy}, \varepsilon_{ip}$ – интенсивность деформации в момент образования шейки и разрушения при испытании образов на растяжение;

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

$\varepsilon_\rho, \varepsilon_\theta, \varepsilon_n$ – компоненты деформации в меридиональном, тангенциальном направлениях и в направлении нормали к срединной поверхности заготовки;

$K_\theta = \varepsilon_\theta / \varepsilon_n$ – коэффициент отношения главных деформаций;

e_i – степень деформации;

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

e – основание натурального логарифма;

e_{iy}, e_{ip} – предельные до потери устойчивости пластического деформирования и разрушения степени деформации;

ν_ε, ν_σ – характеристики вида деформированного (индекс ε) и напряженного (индекс σ) состояния;

ω_i – коэффициент использования запаса (ресурса) пластичности;

ψ_y, ψ_p – относительное сужение площади поперечного сечения образца в момент образования шейки и разрушения;

E – модуль упругости;

G – модуль упругости при сдвиге;

μ – коэффициент Пуассона;

$\sigma_т$, $\sigma_{0,2}$ – физический и условный предел текучести;

$\sigma_в$ – временное сопротивление;

$\sigma_{в0}$ – временное сопротивление в исходном состоянии;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные нормальные напряжения;

$\sigma_к$ – нормальное контактное напряжение;

σ_i – интенсивность напряжений;

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

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;

A – работа;

$A_{уд}$ – удельная работа формоизменения;

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

n – коэффициент деформационного упрочнения металла заготовки;

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

$\sigma_{ср}$ – среднее сопротивление материала деформированию;

q – удельное усилие;

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

$\sigma_{кр}$ – критическое напряжение;

K_σ, K_e, K_ω – коэффициенты запаса прочности по напряжениям, деформациям, ресурсу пластичности;

$P_{кр}$ – критическая нагрузка;

$[\sigma], [e_i], [\omega_i], [P]$ – допустимые значения напряжения, деформации, ресурса пластичности, усилия;

P – усилие;

$E_к$, $E_с$ – касательный и секущий модули;

E_{σ_i} – относительный касательный модуль;

f – коэффициент трения;

ρ_0 – плотность материала;

t – температура;

τ – время;

$K_т$ – коэффициент эффективности термообработки;

$П_i$ – параметр применимости;

НДС – напряженно-деформированное состояние;

ОМД – обработка металлов давлением;

ХШ – холодная штамповка;

ОПД – очаг пластической деформации;

ТКИ – технологичность конструкции изделия;

ТП – технологический процесс.

1. ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЮ ПАТРОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

1.1. Технология производства – прикладная техническая наука

По мере роста человеческих знаний рамки отдельных отраслей науки со временем становятся тесными и от них отпочковываются новые ветви, получающие право на самостоятельное существование. При этом характерным является развитие многосторонних связей между фундаментальными и прикладными техническими науками, например между технологией металлов и технологией машиностроения. Эти науки изучают возможности создания и управления производством металлических изделий с использованием современных методов обработки: давлением и резанием, термообработки, химической, электромагнитной и другими.

Поведение металла в нагружаемой конструкции зависит не только от формы и размеров изделия, но и от свойств исходного материала, способов его технологической обработки и, как следствие, от формируемой структуры и физико-механических свойств.

Производство боеприпасов к стрелковому и артиллерийскому вооружению, по существу, выделилось из технологии машино- и приборостроения.

Действительно, в самом общем случае технологический процесс изготовления выстрела (стрелкового, артиллерийского) включает в себя следующие составные части:

а) технологические процессы изготовления элементов из конструкционных материалов (металлических и неметаллических);

б) технологические процессы изготовления пиротехнических составов и взрывчатых веществ;

в) технологические процессы сборки узлов (средств воспламенения, взрывателей, пуль, снарядов) и выстрела.

Выделение основ технологии металлических элементов боеприпасов в самостоятельный раздел определяется общностью свойств обрабатываемых исходных материалов; технологических и эксплуатационных свойств объектов технологии и готовых деталей; физико-механических явлений, протекающих в процессах технологической обработки заготовок и функционирования готовых деталей и их закономерностей; общностью техно-

логии, структуры, организации производства и его управления и высоким удельным весом и значимостью производства металлических элементов в производстве боеприпасов в целом и его массовым характером.

Целью технологии производства боеприпасов является анализ и разработка общих принципиальных основ рационального построения комплексных техпроцессов изготовления изделий с обеспечением их заданных свойств, включая изучение закономерностей протекания технологических процессов и выявление параметров, позволяющих интенсифицировать производство при повышении его качества и точности. При этом подразумевается, что комплексные процессы основаны на реализации выполняемых в определенной последовательности различных простых и комбинированных методов обработки, механической обработки давлением и резанием, тепловой, химической, термохимической и др.

Следовательно, технология производства боеприпасов в целом и технология изготовления их металлических элементов в частности должны рассматривать и изучать:

1) физические основы комплексной технологии как системы, базирующейся на применении различных форм движения материи и, соответственно, различных методов обработки, формирования, прогнозирования и оптимизации качества технологических процессов;

2) физические основы формирования, прогнозирования и оптимизации качества объекта технологии как продукта комплексной технологии;

3) научно-методические основы прогнозирования и проектирования технологии производства изделий.

Следовательно, при системном подходе к изучению технологии производства выделяем три стороны основной задачи:

а) физика комплексных процессов и качества объектов технологии (физическая);

б) научно-методические основы проектирования комплексных технологических процессов (методологическая);

в) научно-методологические основы технологического прогнозирования (прогностическая).

Предметом исследования являются объекты технологии со сложными свойствами и комплексные технологические процессы, основанные на синтезе различных по физической природе элементарных процессов и явлений (механических, физических, фи-

зико-химических и др.). Установление общих закономерностей протекания различных процессов с учетом их взаимного влияния и составляет предпосылку научного подхода к разработке технологии.

В силу сказанного «Технология производства…» относится к так называемой «пограничной» науке и характеризуется синтезом научных знаний, обусловленным комплексным характером решаемых проблем и, соответственно, сложной структурой взаимосвязи с другими науками.

Использование результатов исследований фундаментальных наук и доведение их до инженерного решения применительно к производству боеприпасов позволяет разрабатывать новые прогрессивные ресурсосберегающие технологические процессы для серийного и массового производства и на их основе создавать высокопроизводительные машины и автоматические линии.

1.2. Характеристика патронов как объектов технологии

Ключевыми понятиями, определяющими содержание исследуемой области знаний, являются понятия об объекте технологии, технологическом процессе, методах обработки, их свойствах и качестве.

Основу совокупности рассматриваемых технических понятий составляют понятия объектов технологии (патронов стрелкового оружия). Это определяется, во-первых, значимостью объектов технологии как общественно необходимых продуктов труда, определяющих целевую функцию технологии, и, во-вторых, логикой познания. Познанию процессов и методов обработки должно предшествовать познание предмета.

Понятие об объекте технологии вытекает из общего понятия о предмете как вещественной форме организации материи, являющейся продуктом организованной деятельности человека. Совокупность существенных для определенной стадии жизненного цикла изделия свойств выражает его качественную и количественную определенность и может выражаться вектором, определяющим пространство свойств объекта как системы распознавания:

$$C_n^к = \left\{C_{n1}^к, C_{n2}^к, ..., C_{nq}^к\right\},$$

где $C_{n1}^к, C_{n2}^к, ..., C_{nq}^к$ – составляющие вектора свойств объекта $C_n^к$; $q = mp$; m – число степеней свободы, определяемое числом реа-

лизуемых разнородных методов обработки и воздействий в пределах жизненного цикла изделия; p – число сопряженных с i–й формой воздействия (методов обработки) свойств объекта.

Каждый объект технологии на любой из стадий своего жизненного цикла потенциально обладает бесчисленным множеством свойств разного уровня, которые проявляются в процессе взаимодействия с внешней по отношению к нему средой (элементами среды). Поэтому при системном подходе для полной характеристики рассматриваемого объекта (*0*) – боеприпаса как предмета – следует учитывать его основные, наиболее существенные свойства, проявляемые при взаимодействии с подсистемами конструирования (*1*), изготовления (*2*), сбыта (*3*), эксплуатации (*4*), восстановления и ремонта (*5*), утилизации (*6*), в совокупности формирующие условно выделенную нами систему – «боеприпасы» (рис.1.1).

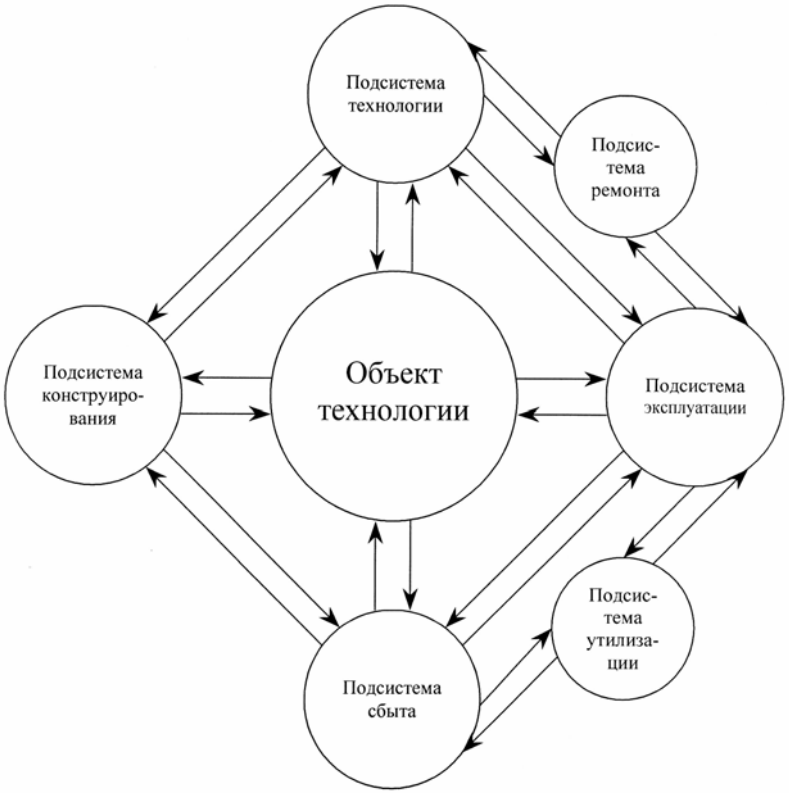


Рис. 1.1. Схема системных связей объекта технологии – боеприпаса

В соответствии с этой схемой целесообразно выделить характерные группы свойств анализируемых объектов: конструктивные, технологические, эксплуатационные, экономические, ремонтные, утилизационные. При этом ремонтные и утилизационные свойства можно рассматривать как разновидность эксплуатационных.

В свою очередь показатели каждой из выделенных групп свойств объектов технологии по своей физической природе могут быть геометрическими, механическими, собственно физическими и комплексными.

К группе эксплуатационных свойств изделия в наиболее общем случае относятся (ГОСТ 22851-77) показатели:

1) назначения – характеризуют свойства изделия, определяющие основные функции, для выполнения которых оно предназначено, и обусловливают область его применения;

2) надежности – характеризуют свойства безотказности, ремонтопригодности и сохраняемости изделия;

3) эргономичности – характеризуют систему «человек – изделие» и учитывают комплекс свойств человека-оператора (бойца), проявляющихся в процессе эксплуатации боеприпасов;

4) эстетичности – характеризуют информационную выразительность, рациональность формы, целостность композиции и совершенство производственного исполнения;

5) транспортабельности – характеризуют приспособленность продукции к перемещению в пространстве, не сопровождающейся ее использованием по назначению;

6) безопасности – характеризуют особенности изделия, обуславливающие безопасность обслуживающего персонала;

7) экологические – характеризуют уровень вредных воздействий на окружающую среду, возникающих при эксплуатации изделия.

С технической точки зрения наиболее важными для патронов являются показатели назначения и надежности: первые из них характеризуют многообразие (номенклатуру) изготавливаемых изделий, вид и количество функциональных узлов, а вторые – степень сложности технических требований, предъявляемых к патронам и его элементам. По геометрической форме патроны относятся к классу тел вращения. По наличию функциональных узлов патрон содержит метательную (капсюль-воспламенитель, пороховой заряд, гильзу) и метаемую (пуля, жидкое или

газообразное вещество) части выстрела различного конструктивного исполнения.

Вид показателя назначения во многом определяется целью, которую стремятся достичь при создании технического средства (оружия, боеприпаса).

По совокупности реализуемых целей и, соответственно, показателей назначения можно выделить классы патронов – к боевому и небоевому оружию; подклассы – к бесствольному, короткоствольному, длинноствольному оружию малой, средней и большой мощности; группы – к импульсным устройствам, пистолетам, револьверам, пистолет-пулеметам, винтовкам, карабинам, пулеметам различного калибра (от 5,45 мм до 14,5 мм); подгруппы – для поражения живых и неживых, зачищенных и незачищенных целей, и для создания определенных эффектов (световых, звуковых и пр.), в частности, без поражения целей; виды – простого одинарного (пробивного, останавливающего, трассирующего, бронебойного, зажигательного и т.п.) и сложного, комбинированного (бронебойно-трассирующего, бронебойно-зажигательного-трассирующего и др.) действий.

По конструктивному исполнению патроны могут быть пулевые и непулевые, безоболочечные, полуоболочечные, оболочечные, гильзовые и безгильзовые. Из приведенного перечня видно, что номенклатура изготавливаемых для стрелкового оружия патронов впечатляюще многообразна.

Высокие требования к надежности патронов при эксплуатации с учетом их целевого назначения могут быть обеспечены при формировании в процессе изготовления и сохранении в течение жизненного цикла изделия определенного уровня показателей качества по геометрическим, металлографическим, механическим, физическим и комплексным, баллистическим и другим свойствам.

1.3. Краткие исторические сведения о развитии патронного производства

Начало создания и развития технологии патронного производства можно отнести к 40-м годам XIX столетия. В это время существенно изменяется конструкция ствольного огнестрельного оружия за счет введения заряжания с казенной части с применением унитарного патрона.

В 1865–1870 гг. воспитанниками Михайловской артиллерийской академии генералом А. Горловым и капитаном К. Гуниусом была переделана однозарядная винтовка Бердана, а по существу создана новая. Их винтовка была выполнена из 35 заново разработанных конструктивных элементов, калибр винтовки был уменьшен до 4,2* линии. Заряжалась она впервые унитарным патроном с металлической гильзой. Производство таких патронов начато в 1869 г. на Охтинском пороховом заводе в Петербурге, где был создан патронный завод.

Дальнейшее развитие стрелкового оружия связано с созданием знаменитой многозарядной, магазинной трехлинейной винтовки С.М. Мосина образца 1891 г. и с переходом к эпохе автоматического оружия начиная с 1904 г., когда был принят на вооружение пулемет Максима.

Следует заметить, что параллельно происходило аналогичное совершенствование артиллерийского вооружения. В 1872–1877 гг. молодой инженер-артиллерист В.С. Барановский создал первое скорострельное артиллерийское орудие с одним стволом. Вместо раздельного заряжания пушки пороховым зарядом, ядром и запалом Барановский применил заряжание патроном, который состоял из металлической гильзы, наполненной порохом и снабженной капсюлем-воспламенителем, находящимся в донной части, и снаряда, вставленного в гильзу. В этом орудии после каждого выстрела гильза специальным выбрасывателем удалялась из казенника, а вновь вставленный патрон запирался впервые примененным поршневым затвором.

Создание производства боеприпасов ствольного оружия в современном понимании следует отнести к началу XX в., ко времени появления технологии обработки металлов давлением, и в частности, технологии холодноштамповочного производства.

Начало разработки научных основ производства было заложено А.Г. Матюниным после публикации в Артиллерийском журнале за 1904 г. серии статей по производству и эксплуатации латунных пушечных гильз. Развитие этой отрасли можно условно разделить на четыре периода, отделенных друг от друга двумя мировыми войнами и распадом СССР. После каждой из войн это развитие резко ускорялось, чему способствовали достижения в

* Линия – мера длины в дореволюционной русской системе, равная 2,54 мм.

металлообработке и машиностроении, прикладной механике твердых деформируемых тел, в том числе развитие основ прикладной теории пластичности.

В системе стрелкового оружия патроны являются наиболее устойчивыми и консервативными элементами, так как практически любая их доработка по основным баллистико-конструктивным параметрам неизбежно требует соответствующей модернизации большого количества стрелкового оружия, находящегося на вооружении армии. Поэтому создание принципиально новой конструкции патрона – явление сравнительно редкое, связанное с весьма существенными качественными улучшениями всей системы стрелкового оружия. В зависимости от глубины этих качественных изменений и убедительности преимуществ новых стрелковых комплексов перед старыми решается вопрос о принятии на вооружение нового патрона и образцов оружия под него. Ограниченность условий последующего совершенствования требует вести разработку нового патрона, включая технологию его изготовления, со всей тщательностью и ответственностью. Этому предшествует, как правило, всестороннее экспериментальное и теоретическое обоснование наивыгоднейших конструктивно-технологических параметров патронов, определяющих заданный уровень эффективности стрельбы.

Формирование системы патронов в нашей стране для стрелкового оружия периода Великой Отечественной войны было в основном завершено в 30-е годы прошлого века, что дало возможность к 1940–1941 гг. разработать на ее базе целый ряд принципиально новых образцов автоматического стрелкового оружия. Основу этой системы составлял 7,62-мм винтовочный патрон, первоначально с легкой пулей (масса 9,6 г), свинцовым сердечником и латунной гильзой, с выступающей закраиной, а затем с тяжелой пулей. Номенклатура винтовочного патрона включала патроны с бронебойными (Б-30), бронебойно-зажигательными (Б-32), трассирующими (Т-30), бронебойно-зажигательно-трассирующими (БЗТ) и другими пулями.

Система патронов дополнялась 7,62-мм патроном с пулей со свинцовым сердечником и крупнокалиберными патронами 12,7, 14,5 мм с бронебойно-зажигательными пулями Б-30, Б-32 со стальными и металлокерамическими сердечниками. Патронное производство в данный период было сосредоточено на шести специализированных заводах.

Основным видом продукции патронных заводов в 30-е годы являлись 7,62-мм винтовочные патроны с легкой и тяжелой пулями. В этот период решались вопросы совершенствования технологии патронного производства. Было освоено производство гильз и пульных оболочек из биметалла вместо латуни и мельхиора, что позволило экономить до 96% цветных металлов. О важности этой работы можно судить по следующим данным: для выполнения программы 1940 г. по изготовлению винтовочного патрона с гильзой из латуни и пульных оболочек из мельхиора потребовалось бы 18 тыс. т латуни и 4,8 тыс. т мельхиора.

Во второй половине 30-х годов некоторые патронные заводы освоили производство гильз к 7,62-мм винтовочным патронам из стальной холоднокатаной полосы. В связи со значительным расходом свинца для сердечников пуль (свинец составлял 75% массы пули) были разработаны патроны с пулями со стальным сердечником, что позволило более чем вдвое сократить расход свинца. Производство гильз и пульных оболочек из биметалла и стали потребовало значительных изменений технологического процесса. Все формообразующие операции, кроме обточки фланца, обрезки полуфабрикатов, выполняли методом холодной штамповки. Продолжительность формообразующих операций была весьма малой и составляла 0,2–0,3 с. Выпуск патронов необходимого количества и качества обеспечивался строгим соблюдением жестких режимов технологического процесса при минимальном выборочном контроле геометрических размеров и массы в процессе производства и приемки изделий. Отработанная в этот период технология обеспечивала массовый выпуск патронов, их точность, стабильность и устойчивость; относительно высокую стойкость рабочего инструмента; качество и надежность патронов.

Большое внимание в предвоенные годы было уделено созданию на патронных заводах собственной станкостроительной базы. Это позволило отказаться от оснащения производства импортным оборудованием. По конструкции, надежности и производительности выпускаемые станки не уступали зарубежным аналогам. На базе созданных цехов специального станкостроения патронные заводы стали выпускать универсальные металлорежущие станки: токарные, фрезерные, шлифовальные. В этот период сформировалось одно из направлений конверсии производства, расширяющего технологические и экономические возможности предприятий отрасли и рынка сбыта их продукции. Это направление реализо-

вало возможности вспомогательного производства и создало мощные предпосылки для его выживания после Второй мировой войны.

Третий период развития этой отрасли начался в годы Великой Отечественной войны и характеризовался качественными изменениями в конструкциях боеприпасов и технологии их изготовления. Была создана, по существу, современная система патронов стрелкового оружия и налажено их комплексное автоматизированное производство.

В 1943 г. был разработан промежуточный по мощности 7,62-мм автоматный патрон образца 1943 г. с пулей со стальным сердечником и со специальными пулями: трассирующей Т-45 и бронебойно-зажигательной. В 60-е годы приняты на вооружение пистолетный 9-мм и 5,45-мм малоимпульсный автоматный патроны, что завершило модернизацию существовавшей системы основных штатных патронов стрелкового оружия.

Коренное совершенствование патронного производства в этот период связано с решением трех главных проблем: 1) разработка металлургами и освоение технологами-штамповщиками нестареющих сталей марок 11ЮА и 18ЮА с высокой штампуемостью; 2) разработка и внедрение в производство эффективной технологии фосфатирования стальных заготовок и деталей; 3) создание комплексного автоматизированного производства на основе автоматических роторных и роторно-конвейерных линий.

Решение первых двух проблем позволило создать эффективное производство боеприпасов к стрелковому и артиллерийскому вооружению с применением стальных гильз. Это привело к значительному сокращению расхода дефицитных и дорогих материалов: гильзовых латуней Л68, Л70, Л72 и др.

Формирование концепции комплексного автоматизированного производства началось в 1943 г., когда при одном из заводов инженер, в последующем академик Л.Н. Кошкин создал СКБ патронного станкостроения (ЦКБПС) для разработки роторных линий патронного производства. В мае 1944 г. Государственный комитет обороны принял решение о преобразовании ЦКБПС в самостоятельную организацию ЦКБ-3.

В 1945 г. план выпуска патронов и артиллерийских боеприпасов стал снижаться, что означало наступление периода послевоенной конверсии. К концу войны на ряде заводов были созданы перспективные конструкторские и технологические бюро, задачей

которых была организация конструкторской и технологической подготовки производства гражданской продукции. Это позволило без обвальной конверсии, в короткие сроки, перестроить работу предприятий в 1945–1955 гг. Однако 1955–1960-е годы характеризовались ускоренным перевооружением страны; в это время руководством СССР была изменена военная доктрина, в соответствии с которой армия ориентировалась преимущественно на вооружение ракетно-космическими системами для обеспечения необходимой военной мощи. Поэтому основным направлением конверсии для ряда оборонных предприятий стало перепрофилирование на выпуск другой продукции военного назначения. В 1960-е годы продолжалась также тенденция на освоение оборонными заводами производства гражданской продукции (холодильников, станков, пильных цепей, патронов к спортивно-целевому и охотничьему оружию и др.). Характерной особенностью конверсии в этот период являлась ограниченность цели, как по объему выпуска гражданской продукции, так и по форме организации производства. Все производство изделий гражданского назначения было организовано на базе отдельных участков, цехов, иногда и завода в заводе и подчинялось основному производству. В то же время, несмотря на появление в армиях ведущих стран мира ядерных и других новейших средств борьбы, командование сухопутных войск по-прежнему считало, что стрелковое оружие и в этих условиях сохраняет свое значение как наиболее массовое индивидуальное и групповое. Основные его достоинства – малый вес и размеры при относительно большой огневой мощи, обеспечивающей поражение живой силы и других слабозащищенных целей, а также создание сплошного заградительного огня на ближних дистанциях. Это определило сохранение и некоторое развитие оборонного потенциала патронных заводов, НИИ и КБ.

Начиная с 1941 г., оборонная промышленность страны возглавлялась военно-промышленным комитетом (ВПК). Практически он определял все виды оснащения армии всеми видами вооружения. Организатором и руководителем ВПК (1941–1985) был Д.Ф. Устинов – министр оборонной промышленности, позднее министр обороны. Такой подход, с одной стороны, позволил создать в промышленности привилегированный сектор, который отличался исключительно высоким научно-техническим потенциалом, не уступающим мировому, а во многих случаях и превосходящим его, и тем самым обеспечил победу в войне про-

тив гитлеровской Германии. С другой стороны, это способствовало созданию однобоко развитой экономики, ориентированной на военные нужды и полностью определяемой волевыми административными решениями руководства страны.

В конце 80-х годов начался четвертый период – период крупномасштабной, неуспешной, обвальной конверсии оборонной промышленности, в том числе и патронного производства. Этот период еще не завершен. Следует заметить, что, начиная с 60-х годов, в мире (не только в нашей стране) практически не было примеров успешной крупномасштабной конверсии. Американское агентство по контролю над вооружением констатировало, что в 80-е годы 85% конверсионных проектов потерпели крах. Мировой опыт свидетельствует, что процесс конверсии «не пошел». Но совершенно бесспорно то, что необходимо сконцентрировать и развивать научно-технологический потенциал военной промышленности путем поддержки только первоклассных НИИ, КБ и заводов, ориентировать военный бюджет на увеличение расходов на научно-исследовательские (НИР) и опытно-конструкторские (ОКР) работы за счет сокращения расходов на массовый выпуск изделий. Это означает, что создание новых образцов оружия все чаще будет обрываться на стадии проектирования, без массового производства. Главное – улучшение качества военных технологий без расходов на их выпуск, который в случае необходимости может быть достаточно быстро развернут.

Одним из сформировавшихся направлений четвертого периода конверсии патронного производства, на наш взгляд, следует считать создание стрелкового оружия и боеприпасов к нему для борьбы с террористами и проведения специальных разведывательно-диверсионных операций в тылу противника, а также так называемого служебного и гражданского стрелкового оружия. Примером таких средств для отечественного спецназа стала единая система бесшумного стрелкового оружия, разработанная в ЦНИИТОЧМАШ (г. Климовск) в 1980-х гг. («Винторез» – БСК) и военного снайперского комплекса ВСК-94, разработанного в конструкторском бюро приборостроения (г. Тула), освоенных патронными заводами. Другим направлением совершенствования боевого штатного стрелкового оружия является создание более мощных патронов, обеспечивающих повышение эффективности поражения защищенных броней целей.

1.4. Основные понятия о производственном и технологическом процессах

Производственный процесс есть совокупность совместных действий исполнителей и средств производства, в результате которых из исходных материалов (сырья, полуфабрикатов или заготовок) и (или) составных частей изделия получают продукцию определенного назначения. Производственный процесс в целом состоит из ряда взаимосвязанных процессов: основных, вспомогательных производственных и непроизводственных (обслуживающих) и технической подготовки производства. К основным относятся технологические процессы изготовления патронов стрелкового оружия и их элементов, составляющих предметную область соответствующей отрасли народного хозяйства.

Под технологическим процессом принято понимать совокупность действий исполнителей и средств производства, направленных на изменение формы, размеров, шероховатости поверхности, взаимного расположения конструктивных элементов и физико-механических свойств материалов обрабатываемых заготовок (полуфабрикатов, сырья) для получения готового изделия (детали или сборочной единицы). При этом готовыми изделиями следует считать продукцию, прошедшую все стадии технологического процесса, не требующую обработки на данном предприятии, укомплектованную, принятую отделом технического контроля и «Заказчиком» и предназначенную для отправки (или сданную на склад готовой продукции).

К вспомогательным производственным процессам относят процессы, обеспечивающие бесперебойное осуществление основного процесса производства патронов, а именно: технологические процессы изготовления инструмента, штампов, инструментальных блоков, приспособлений, нестандартного оборудования, ремонтного обслуживания, производства электроэнергии, пара, сжатого воздуха и т.п.

Вспомогательные непроизводственные (обслуживающие) процессы включают в себя технический контроль выполнения основных и вспомогательных производственных процессов и качества продукции, материально-техническое снабжение, процессы транспортирования, в том числе межцеховые, межоперационные, складские всех видов, лабораторное обслуживание.

Техническая подготовка производства включает конструкторскую и технологическую подготовку.

Конструкторская подготовка производства обеспечивает формирование необходимого комплекта конструкторской документации для запуска основной (товарной) продукции в серийное производство.

Под технологической подготовкой производства (ТПП) понимается совокупность взаимосвязанных процессов, обеспечивающих технологическую готовность предприятия к выпуску изделий заданного уровня качества при установленных сроках выпуска и затратах. Полная технологическая готовность предполагает наличие на предприятии полного комплекта технологической документации и средств технологического оснащения для производства изделий. В системе ТПП решается ряд задач, группируемых по следующим направлениям:

- обеспечение технологичности конструкции изделия;
- проектирование технологических процессов;
- проектирование и изготовление средств технологического оснащения;
- организация и управление ТПП.

Перечисленные направления охватывают ТПП, в том числе конструктивно-технологический анализ изделия, организационно-технический анализ производства, расчет производственных мощностей, составление производственно-технических планировок, определение материальных и трудовых нормативов, отладку технологических процессов и средств технологического оснащения.

В машиностроении производственный и технологический процессы делят на так называемые фазы: заготовительную, обработочную и сборочную. Количество и содержание фаз зависят от принятой в отрасли и на предприятии формы организации производства.

Заготовительная фаза производственного процесса включает в себя частично или полностью литейное и прокатное производство с получением листового и (или) сортового проката металла, иногда с его раскроем на штучные заготовки, например кружки́.

Обработочная фаза производственного процесса объединяет технологические процессы изготовления металлических элементов изделий из штучных заготовок с применением методов обработки давлением, резанием, термической и химической обработки и др.

Сборочная фаза производственного процесса состоит из технологических процессов изготовления сборочных единиц (узлов) и изделий в целом.

Производство патронов может быть организовано либо без заготовительной, либо с заготовительной фазой, но с обязательной реализацией обработочной и сборочной фаз. Например, заготовительная фаза производства патронов с биметаллическими гильзами и оболочками может включать технологию изготовления биметаллической ленты определенного сортамента.

Сборочная фаза включает технологические процессы монтажа пуль и снаряжения патронов. Стальные полосы и ленты предприятия получают с металлургических заводов, имеющих литейные и прокатные цехи по производству стальных слитков, прокатке полос, лент, прутков. В силу специфики производства существует и определенная специализация технологической подготовки в пределах каждой из фаз, которая завершается проектированием технологических процессов заготовительного производства, технологических процессов изготовления элементов и сборки с оформлением отдельных самостоятельных комплектов технологической документации.

Следует обратить внимание на то, что деление процессов на заготовительную и обработочную фазы является в известном смысле условным и зависит от принятой в отрасли и на предприятии формы организации производства. Например, к заготовительной фазе производства артиллерийских гильз отнесен процесс изготовления кружков из полос, а в патронном производстве этот же процесс, как правило, относится к обработочной фазе. В то же время процессы изготовления цилиндрических или сферических объемных сплошных заготовок артиллерийских гильз из прутка методами отрезки в штампе и поперечно-винтовой прокатки, соответственно, иногда относят к обработочной фазе.

Отмеченная условность в составе фаз производственного процесса определяет и условность понятия «исходная заготовка». В соответствии с принятой в стандартах ЕСТД и ЕСТПП терминологией за исходную принимают заготовку перед первой технологической операцией. Условимся в дальнейшем за исходную принимать единичную заготовку, получаемую каким-либо методом и способом обработки и поступающую на первую технологическую операцию проектируемого полного или частичного процесса обработочной фазы производства металлических элементов патронов. Структурной единицей любого полного или частичного технологического процесса, учитываемой при его проектировании, а также служащей для его нормирования, планирования, учета, контроля и для оплаты труда, является технологическая операция.

Технологической операцией называют законченную часть технологического процесса, выполняемую над одним или несколькими одновременно обрабатываемыми объектами (заготовкой, сборочной единицей, деталью) на одном рабочем месте (прессе, станке, конвейере и т.п.) одним рабочим или группой рабочих, либо в условиях автоматизированного производства под наблюдением рабочего.

Различают основные и вспомогательные операции. Основные технологические операции – это операции, в результате выполнения которых под воздействием средств труда (технологической оснастки и машин) изменяется состояние (форма, размеры, состояние поверхности, структура и физико-механические свойства) предметов труда (обрабатываемых заготовок, сборочных единиц). Вспомогательные операции – это операции, не вызывающие изменение состояния предметов труда и предназначенные для обеспечения основных технологических операций. К ним относятся транспортирование заготовок, сборочных единиц, деталей и изделий, комплектация, технический и приемочный контроль и некоторые другие операции.

Законченной частью технологической операции может служить технологический переход, выполняемый одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах на определенной позиции технологической оснастки (штампа, приспособления).

Технологические операции могут выполняться различными методами обработки. Под методом обработки понимается совокупность наиболее общих правил, определяющих последовательность и содержание действий при обработке объекта технологии (безотносительно к наименованию, типоразмеру изделия) на основе реализации какой-либо простой или сложной формы технологического движения, например: механической по обработке давлением и резанием; тепловой, в частности термической; химической; электромагнитной, в частности электрической, плазменной, светолучевой; электрофизической и др.

1.5. Свойства технологических процессов как объектов проектирования и эксплуатации

При проектировании и сопровождении технологического процесса технолог должен иметь четкое представление о свойствах

(признаках качества) процесса и методах решения задач по обеспечению требуемых свойств и качества. Состав признаков качества технологических процессов может быть установлен на основе системного подхода. Любой технологический процесс или его часть может рассматриваться как системный объект и описываться системными характеристиками: связями с окружающей средой *H*, структурой *S*, функцией *F* и набором свойств *Z*:

$$Q = \{H, S, F, Z\}, \qquad (1.1)$$

где Q – системная характеристика технологического процесса.

Относительная выделенность технологического процесса предусматривает наличие связей с окружающей средой *H*. К подсистемам окружающей среды относятся совокупность подразделений производственного процесса и системы управления предприятием, а также социальная и природные среды, взаимодействующие с производственным и, соответственно, технологическим процессами. При этом взаимодействие технологического процесса и окружающей среды представляется в виде связей, разделяемых по направлению взаимодействия на подмножества входов и выходов (рис. 1.2). Важнейшими подсистемами окружающей среды и производственного процесса являются технологическая подготовка производства; область научных знаний, на которой основаны закономерности применяемых в технологическом процессе методов обработки; производство; сбыт готовой продукции, а также социальная и природная среды.

Функция *F* технологического процесса заключается в получении готового изделия с заданным набором свойств из исходной заготовки (сырья, полуфабриката).

Функция технологического процесса может быть описана отображением $C_0 \to C_к$, где $C_0, C_к$ – параметры исходной и конечной заготовки соответственно.

В соответствии с разделением технологического процесса на части (частичные процессы, технологические операции) общая функция расчленяется, например, на ряд операционных функций ψ_i.

Функция каждой операции заключается в преобразовании заготовки из одного промежуточного состояния в другое, т.е. $\psi_i C_{i-1} \to C_i$, где C_{i-1}, C_i – параметры заготовки на предшествующей и последующей операциях.

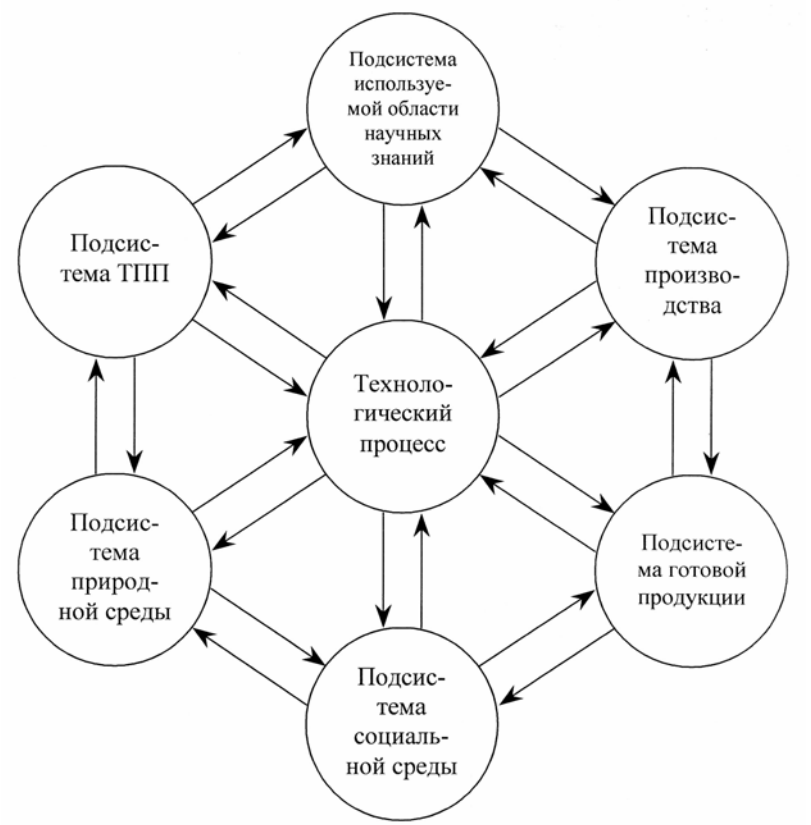


Рис. 1.2. Схема системных связей технологического процесса как объекта проектирования

Важнейшим свойством процесса является его структура *S*, которую следует рассматривать как единство противоположных сторон – расчлененности и целостности. Расчлененность системы характеризует совокупность трех признаков: качество частей, количество частей и их взаимное расположение. Выбор способа расчленения определяется типом решаемых задач. Каждому способу расчленения соответствует определенный тип взаимосвязей частей системы – своя форма целостности. Если системность подразумевает наличие связей между компонентами технологического процесса, а также между процессом и окружающей средой, то целостность характеризует большую силу и существенность внутренних связей по сравнению с внешними связями с окружающей средой.

Качественная и количественная характеристика технологического процесса задается совокупностью свойств Z. При этом следует учитывать известное положение о том, что: *а*) каждый объект рассмотрения а следовательно, и технологический процесс обладают бесчисленным множеством свойств; *б*) свойства объекта анализа проявляются при его взаимодействии с внешней средой.

В соответствии с этим положением и выделенными выше подсистемами производственного процесса (см. рис. 1.2) установим следующие группы показателей качества (свойств) технологических процессов, которые могут служить и признаками для классификации: *1* – технические; *2* – физические; *3* – функциональные; *4* – технико-экономические; *5* – организационно-социальные; *6* – экологические.

Технические свойства проявляются при взаимодействии технологического процесса с подсистемой ТПП, в частности проектирования, физические – с подсистемой научных знаний, функциональные – с подсистемой производства, технико-экономические – с подсистемой сбыта, организационно-социальные – с подсистемой социальной среды, экологические – с подсистемой природной среды.

Системность и синтетический характер свойств технологических процессов проявляются в том, что эти свойства зависят как от свойств составляющих технологический процесс отдельных операций, так и от структуры процесса в целом.

Так как за структурную основу системной совокупности технических понятий в рассматриваемой предметной области приняты понятия объектов технологии (см. п. 1.2), то из этого следует, что важнейшими функциональными свойствами технологического процесса с определенной структурой S (1.1) являются вид и свойства изготавливаемого изделия, характеризуемые вектором конструктивно-технологических характеристик.

С учетом изложенного представим укрупненную модель технологического процесса изготовления изделия в виде соотношения

$$\text{ТП}^k = [\{C_n^k\}, \{S^k\}, \{Z^k\}], \qquad (1.2)$$

где k – рассматриваемый уровень членения технологического процесса (например, уровень операций, совокупности операций или в целом процесса);

$\{Z^k\} = (Z^k_{\text{тех}}, Z^k_{\text{физ}}, Z^k_{\text{фун}}, Z^k_{\text{тэ}}, Z^k_{\text{ос}}, Z^k_{\text{эк}})$ – вектор свойств (показателей) процесса согласно выделенным выше на основе системного подхода группам свойств;

$Z^k_{\text{тех}}, Z^k_{\text{физ}}, Z^k_{\text{фун}}, Z^k_{\text{тэ}}, Z^k_{\text{ос}}, Z^k_{\text{эк}}$ – технические, физические, функциональные, технико-экономические, организационно-социальные и экологические свойства соответственно.

К техническим свойствам $Z^k_{\text{тех}}$ процесса, например, можно отнести тип производства; вид, свойства и способ получения исходной заготовки; уровни использования новой прогрессивной, в том числе прогнозируемой технологии и ее типизации; типаж технологического оборудования; степень детализации содержания разрабатываемого процесса и некоторые другие свойства.

По типу производства различают технологические процессы для единичного, серийного и массового производств. Тип производства – классификационная категория, выделяемая по признакам широты номенклатуры, регулярности, стабильности и объема выпуска изделий. Одной из основных характеристик типа производства является коэффициент закрепления операций, определяемый как отношение числа всех различных технологических операций, выполняемых в течение месяца, к числу рабочих мест на участке, в цехе. В соответствии с этим серийное производство характеризуется ограниченной номенклатурой изделий, изготавливаемых периодически повторяющимися партиями и сравнительно большим объемом выпуска. В зависимости от количества изделий в партии и значения коэффициента закрепления операции $(k_{\text{з.о.}})$ различают мелкосерийное $(k_{\text{з.о.}} = 20...40)$, среднесерийное $(k_{\text{з.о.}} = 10...20)$ и крупносерийное производство $(k_{\text{з.о.}} = 1...10)$. Массовое производство характеризуется узкой номенклатурой и большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых в течение продолжительного времени $(k_{\text{з.о.}} = 1)$. Единичное производство характеризуется широкой номенклатурой изготавливаемых изделий и малым объемом выпуска $(k_{\text{з.о.}} > 40)$. За объем выпуска принимается количество изделий, изготавливаемых в течение планируемого интервала времени.

По виду применяемых материалов и способу получения исходных заготовок целесообразно различать технологические процессы изготовления металлических элементов изделий из компакт-

ных и дискретных (порошковых) материалов, в том числе полос, лент, труб, прутка (проволоки), плоских осесимметричных, плоских неосесимметричных, пространственных, осесимметричных сплошных и полых заготовок, получаемых способами отрезки на пресс-ножницах, в штампах, с применением комбинированной штамповки (редуцирования – отрезки, вырубки – редуцирования, вытяжки – выдавливания и т.п.) на прессах, холодно-высадочных и горячештамповочных автоматах.

По степени использования в технологических процессах новых прогнозируемых методов обработки различают рабочие и перспективные процессы.

По степени охвата изготавливаемых изделий выделяют 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 изделий с общими конструктивно-технологическими признаками, определяющими их технологическое подобие. Групповой технологический процесс есть также процесс изготовления группы изделий, но, в отличие от типового, он предназначен для изготовления не изделий в целом, а только их одинаковых конструктивных элементов (пазов, отверстий, фланцев и т.п.) на универсальной технологической оснастке.

Типовой технологический процесс служит информационной основой для разработки единичных процессов. К этой же группе свойств техпроцессов могут быть также отнесены типаж технологического оборудования и степень детализации содержания разрабатываемого процесса.

По типу применяемого оборудования, в соответствии с классификацией академика Л.Н. Кошкина, следует различать процессы изготовления с применением комплексов машин I (раздельное прессовое и станочное оборудование), II (станки ротационного типа), III (автоматические роторные (АРЛ) и роторно-конвейерные (РКЛ) линии), IV (агрегаты) классов в отдельности, а также составленных путем сочетания машин различных классов (I–II, I–III, I–IV, I–III–IV, III–IV и т.д.).

По степени детализации содержания процессов выделяют маршрутные, операционные и маршрутно-операционные процессы. Маршрутный процесс представляется в виде сокращенного описания всех технологических операций в маршрутной карте в

последовательности их выполнения без указания переходов и технологических режимов. Операционный процесс дает полное описание всех технологических операций в последовательности их выполнения с указанием переходов и технологических режимов. Маршрутно-операционный процесс есть сокращенное описание технологических операций в маршрутной карте в последовательности их выполнения с полным описанием отдельных операций в других технологических документах.

Понятие технологического процесса, применимое к сфере производства материальных вещественных объектов, следует рассматривать как закономерную, последовательную, непрерывную смену следующих друг за другом взаимосвязанных явлений, вызываемых реализацией различных разновидностей физической, в широком понимании этого слова, формы движения материи, именуемой в дальнейшем технологическим движением. К основным реализуемым в практической технологии формам относятся условно простые (механическая, тепловая, электромагнитная, химическая, молекулярная) и сложные, синтезированные из перечисленных простых. Взаимодействие пластически деформируемых металлических материалов с внешней, технологической средой, например, в процессах штамповки осуществляется главным образом в виде деформационной, термической и кинетической форм движения. В само́м деформируемом теле возможно взаимодействие еще и других форм движения: диффузионной, фазовой, химической и других. С точки зрения изменения общего энергетического состояния обрабатываемого металлического тела достаточно правильно учесть все внешние взаимодействия, существенные в термодинамическом отношении. Состав «простых» и «сложных» форм технологического движения и, соответственно, разрабатываемых на их основе методов обработки расширяется по мере развития науки и техники. Очевидно, что формы движения, реализуемые в технологическом процессе, определяют закономерности и соотношения между физическими величинами. Поэтому важнейшими физическими признаками качества (свойствами) технологического процесса являются следующие:

1) количество j и состав форм технологического движения, реализуемых в процессе, включая фактическое число форм $l_j \left(0 < l_j < j\right)$, взаимосвязанных общим макрофизическим механизмом;

2) количество $N_м$ и состав методов обработки и их разновидностей, применяемых в процессе в целом, а также для формообразования детали из исходного материала (заготовки) и обеспечения заданного набора свойств;

3) последовательность, количество, состав технологических операций и, соответственно, структура процесса;

4) степень непрерывности технологических воздействий на предмет обработки.

По первым двум признакам целесообразно различать технологические процессы изготовления изделий, основанные на применении какого-либо одного (простого или сложного) и нескольких различных (простых, либо сложных, либо простых и сложных) методов обработки. В первом случае будем именовать процессы монопроцессами, во втором – комплексными. Учитываем, что в простом методе обработки реализуется только одна какая-либо простая $\left(j = 1, l_j = 0\right)$, а в сложном, соответственно, только одна какая-либо сложная $\left(j = l_j \geq 2\right)$ форма технологического движения.

Классификация по составу методов обработки должна базироваться на общей их классификации. Однако следует иметь в виду, что точное деление технологических процессов по методам обработки иногда является условным из-за невозможности проведения четкой грани между реализуемыми формами технологического движения. Тем не менее, деление по методам обработки способствует типизации технологических процессов и облегчает выбор наиболее эффективной в определенных условиях технологии.

По третьему признаку следует различать однооперационные ($n = 1$) и многооперационные ($n \geq 2$) процессы.

По четвертому признаку выделяют непрерывные, прерывистые (дискретные) и смешанного вида процессы. Непрерывные (например, непрерывная разливка стали, поперечно-винтовая прокатка шаровых заготовок) осуществляются в устройствах, где поступление сырья, полуфабрикатов и выгрузка конечных продуктов производится непрерывно. При этом технологическое воздействие на обрабатываемый материал в течение всего технологического цикла сохраняется. Дискретные процессы характеризуются наличием полной разгрузки от технологического воздействия между операциями и переходами (например, падением усилия деформирования до нуля, снижением температуры нагре-

того тела до комнатной температуры и т.п.). Разновидностью прерывистых можно считать периодические процессы, которые выполняются на оборудовании, периодически загружаемом исходными материалами с остановкой на этот период оборудования.

С точки зрения термодинамики обрабатываемое тело (заготовка) рассматривается как термодинамическая система, в которой протекают процессы изменения термодинамического состояния, характеризуемые изменением его параметров. Обычно различают два типа параметров термодинамического состояния: обобщенные термодинамические силы (объемные и поверхностные), характеризующие воздействие внешней, технологической среды на обрабатываемое тело (сила, момент силы, скорость, давление, напряжение, химический потенциал, электрический потенциал, абсолютная температура и др.), и обобщенные термодинамические перемещения, характеризующие реакцию тела на эти воздействия (путь, угол поворота, количество движения, масса, энтропия и др.). Количественной мерой взаимодействия термодинамической системы (обрабатываемого тела) и окружающей технологической среды служит работа. Перечисленные параметры характеризуют количественно физические свойства технологических процессов и, в зависимости от реализуемых форм технологического движения, методов и условий обработки, ограничиваются определенными предельными (критическими) значениями (критическими температурами, предельными напряжениями, степенями деформации и т.п.).

В терминах термодинамики можно различать равновесные, неравновесные, обратимые и необратимые технологические процессы. При равновесном процессе в любом промежуточном состоянии после фиксирования внешних воздействий для конечного интервала времени параметры термодинамического состояния остаются неизменными. Процессы, состоящие из последовательных неравновесных состояний, называются неравновесными. Реальные технологические процессы всегда протекают с некоторой конечной скоростью изменения параметров термодинамического состояния, поэтому они являются неравновесными. Равновесный процесс, который проходит через те же состояния в обратном направлении, что и в прямом, только в обратной последовательности, после чего тело и окружающая технологическая среда приходят в исходное состояние, называется обратимым, в противном случае – необратимым. Необратимы, например, процессы пласти-

ческой деформации, сопровождающиеся рассеянием (диссипацией) энергии. Приведенные понятия целесообразно использовать при разработке математических моделей процессов по отдельным физическим признакам качества.

На основании изложенного понятия структуры и логического отношения части и целого построим иерархическую структуру технологического процесса изготовления элемента (детали) изделия (рис.1.3).

Рис. 1.3. Типовая структура технологического процесса

В каждом из вертикальных рядов понятия размещаются снизу вверх по возрастающей степени обобщенности, от перехода (первый уровень) до технологической операции (второй уровень), простого и сложного циклов операций (третий и четвертый уровни). Единицей сходимости вертикальных рядов служит понятие «технологический процесс» (как целое). В горизонтальных рядах этой схемы размещаются понятия одного порядка. Под циклом будем понимать совокупность операций по обработке объекта технологии, составляющих часть технологического процесса и выполняемых методом обработки металлов давлением и другими

сопутствующими ему методами (например, тепловой, химической обработки и др.).

Принимаем за начало отсчета цикла операцию по обработке металлов давлением (штамповке). При этом предполагается, что в пределах цикла происходит изменение и полное или частичное восстановление состояния обрабатываемого объекта технологии по некоторой совокупности его признаков качества или отдельным признакам качества (например, механическим свойствам материала детали, шероховатости поверхностей, микроструктуре и др.). В простом цикле операция обработки давлением используется однократно, в сложном – многократно. Сложный цикл делится на несколько простых. В частности, технологический процесс может быть представлен в виде одного сложного цикла, а элементарная штамповочная операция – в виде незавершенного простого цикла. Введение понятия цикла облегчает физическое моделирование процессов. Следовательно, при оценке структурных свойств технологических процессов необходимо указывать на вид и количество циклов в процессе. Для характеристики структурных свойств процессов необходимо также учитывать количество одновременно обрабатываемых в технологическом процессе материальных элементов. Тогда, с учетом понятия о циклах, следует различать линейные, линейные бинарные, циклические, циклические бинарные и смешанные технологические процессы. При линейной схеме осуществляется последовательная обработка одного материального элемента. При бинарной схеме чередуются операции ввода дополнительных элементов изделия и (или) технологических элементов (в том числе различного рода покрытий) и их совместной обработки с основным элементом изделия. Циклическая и бинарно-циклическая схемы процессов предполагают возврат к обработке на предыдущих операциях с одним или несколькими элементами.

На рис. 1.3 индексы i, k соответствуют номерам этапов, ij, il – номерам технологических циклов, ijr, ijm – номерам технологических операций, $ijrp$, $ijrn$ – номерам технологических переходов. В табл. 1.1 представлен в соответствии с предложенной структурой типовой технологический маршрут изготовления стальной гильзы с указанием этапов, технологических циклов, операций и методов обработки, с применением которых выполняются эти операции.

Таблица 1.1

Структура технологического процесса изготовления стальной гильзы к патрону крупного калибра из листового проката (полосы)

Этапы		Технологические циклы		Технологические операции		
1	2	3	4	5	6	7
№ пп	Содержание этапа	$\frac{№_{пп}}{N_{эц}}$	Содержание цикла	$\frac{№_{пп}}{N_{эц}}$	Метод обработки	Содержание (наименование) операции
1	Изготовление исходной сплошной заготовки	$\frac{1}{1.1}$	Пластическая деформация – – термообработка – – химическая обработка поверхности заготовки	$\frac{1}{1}$	х.ш.	Вырубка
				$\frac{2}{2}$	т.о.	Отжиг
				$\frac{3}{3}$	х.о.	Травление
				$\frac{4}{4}$	м.о.	Промывка
				$\frac{5}{5}$	х.о.	Фосфатирование
				$\frac{6}{6}$	м.о.	Промывка
				$\frac{7}{7}$	м.о.	Омыление
				$\frac{8}{8}$	тепл.о.	Сушка
2	Формообразование исходной полой заготовки	$\frac{2}{2.1}$		$\frac{9}{1}$	х.ш.	Свертка – выдавливание
				$\frac{10}{2}$	т.о.	Отжиг
				$\frac{11}{3}$	х.о.	Травление
				$\frac{12}{4}$	м.о.	Промывка
				$\frac{13}{5}$	х.о.	Фосфатирование
				$\frac{12}{4}$	м.о.	Промывка
				$\frac{13}{5}$	х.о.	Фосфатирование

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
	То же			$\frac{14}{6}$	м.о.	Промывка
				$\frac{15}{7}$	м.о.	Омыление
				$\frac{16}{8}$	тепл.о.	Сушка
3	Предварительное формообразование стенки детали	$\frac{3}{3.1}$		$\frac{17}{1}$	х.ш.	Вытяжка первая
				$\frac{18}{2}$	т.о.	Отжиг
				$\frac{19}{3}$	х.о.	Травление
				$\frac{20}{4}$	м.о.	Промывка
				$\frac{21}{5}$	х.о.	Фосфатирование
				$\frac{22}{6}$	м.о.	Промывка
				$\frac{23}{7}$	м.о.	Омыление
				$\frac{24}{8}$	тепл.о.	Сушка
		$\frac{4}{3.2}$	То же	$\frac{25}{1}$	х.ш.	Вытяжка вторая
				$\frac{26}{2}$	т.о.	Отжиг
				$\frac{27}{3}$	х.о.	Травление
				$\frac{28}{4}$	м.о.	Промывка
				$\frac{29}{5}$	х.о.	Фосфатирование
				$\frac{30}{6}$	м.о.	Промывка
				$\frac{31}{7}$	м.о.	Омыление
				$\frac{32}{8}$	тепл.о.	Сушка

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
		5/3.3	Пластическая деформация – – химическая обработка поверхности заготовки	33/1	х.ш.	Вытяжка третья
				34/2	х.о.	Обезжиривание
				35/3	х.о.	Травление
				36/4	м.о.	Промывка
				37/5	х.о.	Фосфатирование
				38/6	м.о.	Промывка
				39/7	м.о.	Омыление
				40/8	тепл.о.	Сушка
		6/3.4		41/1	х.ш.	Вытяжка четвертая
				42/2	мех.о.	Обрезка
				43/3	х.о.	Обезжиривание
				44/4	х.о.	Травление
				45/5	м.о.	Промывка
				46/6	х.о.	Фосфатирование
				47/7	м.о.	Промывка
				48/8	м.о.	Омыление
				49/9	тепл.о.	Сушка

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
		7 * / 3.5	Пластическая деформация – – химическая обработка	50/1	х.ш.	Вытяжка пятая
				51/2	мех.о.	Обрезка
				52/3	х.о.	Обезжиривание
				53/4	м.о.	Промывка
				54/5	х.о.	Фосфатирование
				5/6	м.о.	Промывка
				56/7	м.о.	Омыление
				57/8	тепл.о.	Сушка
4	Предварительное формообразование конструктивных элементов дна детали	8/4.1	Пластическая деформация	58/1	х.ш.	Первая штамповка дна
		8/4.2		59/2	х.ш.	Вторая штамповка дна
3		7 * / 3.5	Термообработка – – химическая обработка поверхности заготовки	60/1	т.о.	Отжиг краевой части заготовки
				61/2	х.о.	Травление
				62/3	м.о.	Промывка
				63/4	х.о.	Фосфатирование
				64/5	м.о.	Промывка
				65/6	м.о.	Омыление
				66/7	тепл.о.	Сушка

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
5	Окончательное формирование конструктивных элементов стенки	9/5.1	Пластическая деформация – – химическая обработка	67/1	х.ш.	Обжим первый
				68/2	х.о.	Обезжиривание
				69/3	м.о.	Промывка
				70/4	х.о.	Фосфатирование
				71/5	м.о.	Промывка
				72/6	м.о.	Омыление
				73/7	тепл.о.	Сушка
		10/5.2	Пластическая деформация	74/1	х.ш.	Обжим второй
		11/5.3		75/1	х.ш.	Обжим третий
6	Окончательное формообразование конструктивных элементов дна	12/6.1	Обработка резанием – – химическая обработка	76/1	мех.о.	Сверление затравочных отверстий
				77/2	х.о.	Обезжиривание
				78/3	м.о.	Промывка
				79/4	тепл.о.	Сушка
		13/6.2	Обработка резанием – – химическая обработка поверхности	80/1	мех.о.	Обточка фланца
				81/2	х.о.	Обезжиривание
				82/3	м.о.	Промывка
				83/4	тепл.о.	Сушка
				84/5	мех.о.	Обрезка дульца

Окончание табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
7	Нанесение антикоррозийных покрытий	14/7.1	Химическая обработка поверхности	85/1	х.о.	Обезжиривание
				86/2	м.о.	Промывка
				87/3	х.о.	Травление
				88/4	м.о.	Промывка
				89/5	х.о.	Фосфатирование
				90/6	м.о.	Промывка
				91/7	х.о.	Пассивирование
				92/8	м.о.	Промывка
				93/9	тепл.о.	Сушка
		15/7.2		94/1	м.о.	1-е лакирование
				95/2	м.о.	1-е лакирование

Примечание. х.ш. – холодная штамповка; т.о. – термообработка; х.о. – химическая обработка; мех.о. – механическая обработка резанием; тепл.о. – тепловая обработка; м.о. – молекулярная обработка; * – штамповочная и термическая операции технологического цикла "7" (этап 3) разделены в маршрутной технологии этапом "4".

Структурная схема технологического процесса сборки изделия приведена на рис. 1.4 (индексы *i*, *k* соответствуют технологическим процессам изготовления узлов, *ij*, *il* – подузлов, *ijr*, *ijm* – соответствуют деталям элементов узлов и изделия. Вариант маршрутного технологического процесса изготовления (монтажа) пули тройного действия (бронебойного-зажигательного-трассирующего) представлен на рис. 1.5. Элементами узла (сборочной единицы) «пуля» являются детали (элементы): оболочка, зажигательный состав, стальной сердечник, свинцовая рубашка, подузел (сборочная единица) трассер.

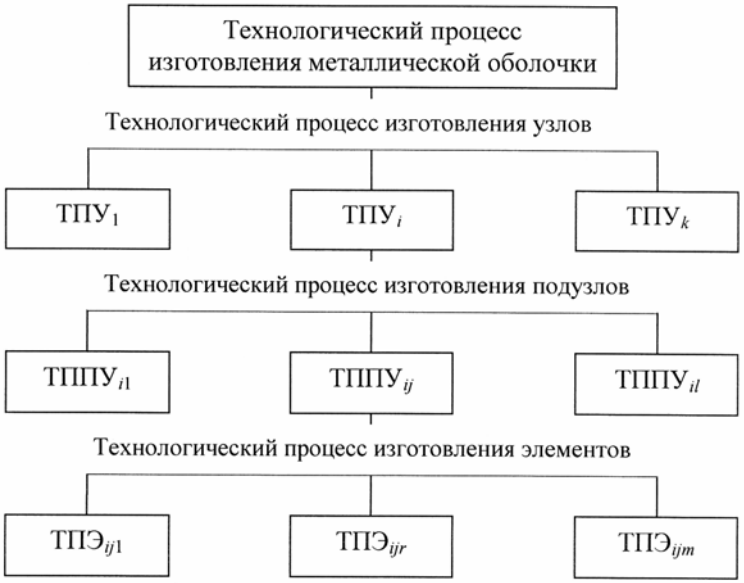


Рис. 1.4. Структурная схема технологического процесса сборки изделия

В свою очередь элементами подузла «трассер» служат пиростакан и размещенный в нем трассирующий состав, который может располагаться в оболочке пули без пиростакана. Схема технологического процесса сборки (снаряжения) патрона показана на рис. 1.6. Элементы патрона, поставляемые на сборку: *1* – порох; *2* – узел «капсюль»; *3* – гильза; *4* – узел «пуля».

Как следует из приведенных схем, основным методом, применяемым для сборки узлов различного уровня и в целом изделия, служит холодная штамповка.

Понятие о функциональных свойствах технологического процесса вытекает из рассмотренного выше понятия его функции и предполагает характеристику по возможному обеспечению соответствия объекта технологии или самой технологии заданным уровням показателей качества. Например, известными мерами оценки точности технологических процессов служат коэффициент точности, коэффициент смещения уровня настроенности, возможная доля брака и др. (ГОСТ 27202-83).

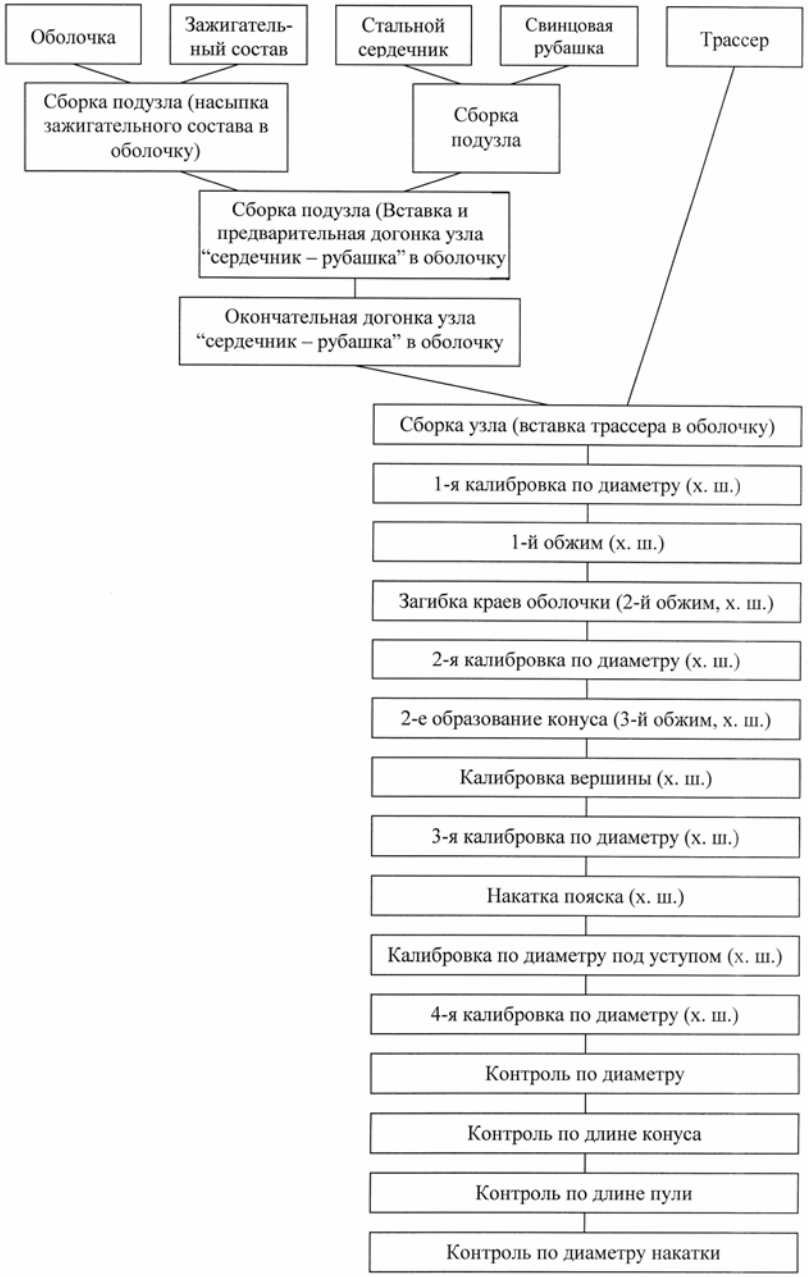


Рис. 1.5. Схема технологического процесса сборки (монтажа) пули комбинированного тройного действия (БЗТ)

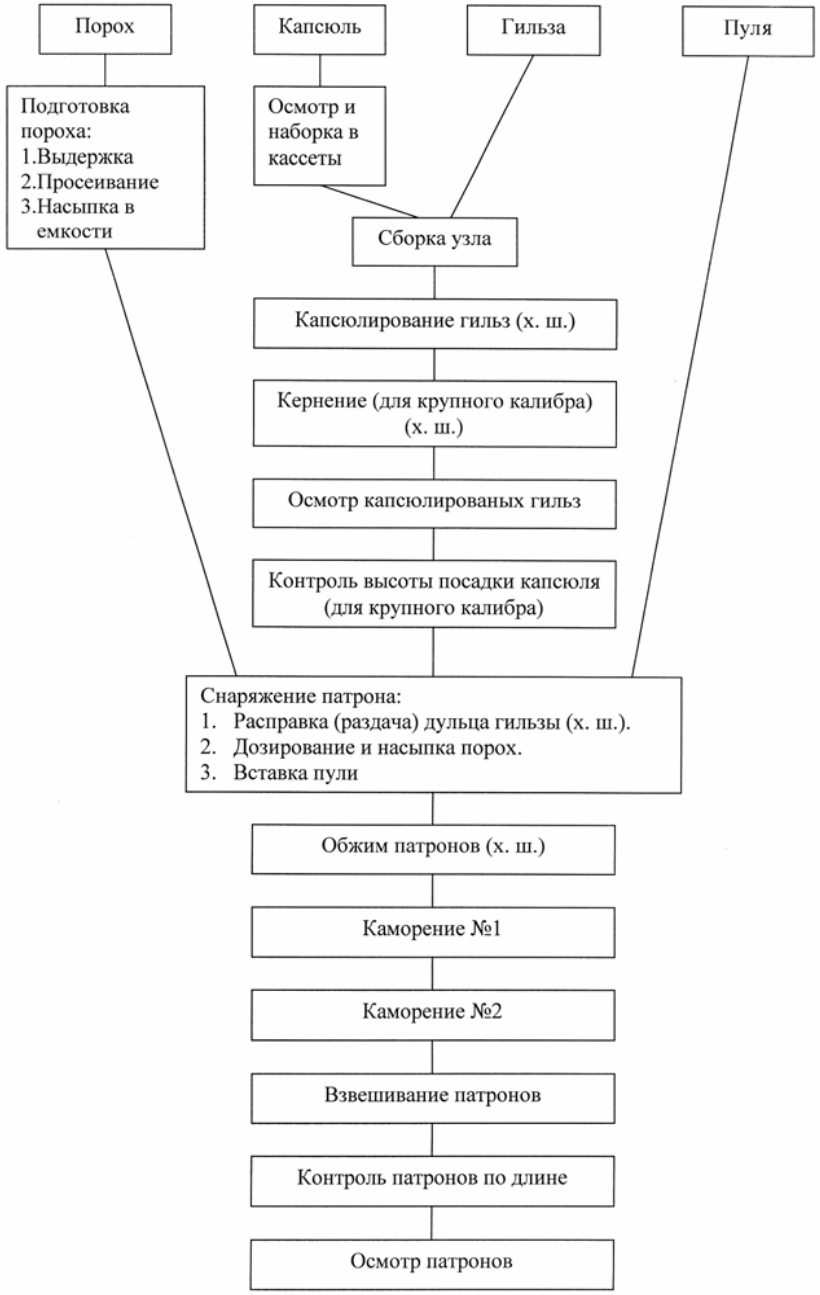


Рис. 1.6. Схема технологического сборки (снаряжения) патрона

Коэффициент точности по контролируемому параметру определяется из равенства

$$K_{\text{т}} = \frac{\omega}{\Pi_{\text{д}}},$$

где ω – поле рассеяния или разность максимального и минимального значений контролируемого параметра за установленную наработку технологического процесса, определяемые с доверительной вероятностью γ по выражению $\omega = l(\gamma)S$; $l(\gamma)$ – коэффициент, зависящий от закона распределения контролируемого параметра; S – среднее квадратическое отклонение контролируемого параметра; $\Pi_{\text{д}} = T_{\text{в}} - T_{\text{н}}$ – поле допуска на величину контролируемого параметра; $T_{\text{в}}, T_{\text{н}}$ – верхнее и нижнее отклонения контролируемого параметра.

Коэффициент смещения контролируемого параметра

$$K_{\text{С}} = \frac{\left(\bar{x}(\tau) - x_0\right)}{\Pi_{\text{д}}},$$

где $\bar{x}(\tau)$ – среднее значение контролируемого параметра; x_0 – значение параметра, соответствующее середине поля допуска.

Коэффициент запаса точности по контролируемому параметру

$$K_{\text{з}}(\tau) = 0{,}5 - K_{\text{с}}(\tau) - 0{,}5K_{\text{р}}(\tau),$$

где $K_{\text{р}}(\tau) = \omega(\tau)/\Pi_{\text{д}}$ – коэффициент мгновенного рассеяния; $\omega(\tau)$ – поле рассеяния в момент времени τ.

Показатель стабильности технологического процесса характеризует постоянство во времени оценок параметров распределения изучаемого признака качества (среднее, дисперсия, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации).

Устойчивость технологического процесса – это его свойство сохранять показатели точности во времени при функционировании технологического процесса без остановок. Весьма важным функциональным свойством любого процесса является его надежность, характеризующая способность сохранять во времени и в установленных пределах значения всех параметров, обеспечивающих выполнение требуемых функций в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и восстановления.

При оценке надежности технологических процессов по параметрам качества изготовляемой продукции все показатели надеж-

ности делят на четыре группы (ГОСТ 27.202-83): точностные, технологической дисциплины, выполнение заданий по качеству, комплексные.

Контроль точности технологических процессов выполняется по альтернативному (степени соответствия параметров технологического процесса требованиям, установленным в нормативно-технологической документации) или количественному (коэффициентам смещения, запасу точности и др.) признаку.

Показатели технологической дисциплины устанавливаются по результатам сверки технологических процессов по ГОСТ 16310-78.

К показателям надежности технологических процессов по выполнению заданий по параметрам качества относятся следующие:

1) вероятность выполнения задания по одному (i-му) параметру изделия – вероятность выполнения требований нормативно-технологической документации по этому параметру для единицы продукции, изготовленной в момент времени τ:

$$P_i(\tau) = P\{x_{\text{н}i} \le x_i(\tau) \le x_{\text{в}i}\};$$

2) вероятность выполнения заданий по n параметрам продукции, изготавливаемой в момент времени τ:

$$P_1,...,n(\tau) \le P\{x_{\text{н}1} \le x_1(\tau) \le x_{\text{в}1};...;x_{\text{н}n} \le x_n(\tau) \le x_{\text{в}n}\};$$

3) коэффициент выполнения заданий по параметрам изготовляемой продукции:

$$K_{\text{в}}(\tau) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i(\tau),$$

где $x_i(\tau), x_{\text{в}i}, x_{\text{н}i}$ – соответственно фактическое, верхнее и нижнее значения i-го контролируемого параметра; n – количество контролируемых параметров.

К комплексным показателям надежности технологических процессов, согласно ГОСТ 27.202-83, относят критерии дефектности, критерии возврата продукции и критерии брака.

Для оценки показателей надежности технологического процесса по параметрам качества изготавливаемой продукции используют расчетные, опытно-статические, регистрационные или экспертные методы (ГОСТ 27.202-83). Для предварительной оценки надежности технологических процессов используют также так называемый метод квалитетов.

К группе технико-экономических свойств технологических процессов относятся общие и частные технико-экономические показатели: трудоемкость и технологическая себестоимость изготовления, а также материалоемкость, энергоемкость и др.

К группе организационно-социальных свойств процессов могут быть отнесены социальные (например, уровень механизации и автоматизации труда) и организационно-плановые показатели (длительность производственного цикла, коэффициенты использования оборудования во времени, коэффициент синхронности выполнения операций, размер и ритм запуска партий деталей, запускаемых в производство, и др.).

Качественную оценку механизации и автоматизации технологических процессов проводят по их виду, ступени и категории. По видам механизацию и автоматизацию технологических процессов разделяют на единичную и комплексную. При единичной механизации или автоматизации механизируется (автоматизируется) только какая-либо одна операция. При комплексном виде механизируется или автоматизируется весь технологический процесс, например, от заготовительного участка до укупорки готовых изделий в тару (полнокомплексная) или отдельные операции, участки (неполнокомплексная). Механизация и (или) автоматизация технологических процессов может применяться, в зависимости от конкретных условий, на любом структурно-самостоятельном подразделении технологического процесса.

Выделяют 10 ступеней применяемости механизации и автоматизации технологических процессов (от единичных операций до организации технологии на уровне всей промышленности):

1 – единичная технологическая операция;

2 – законченный технологический процесс (система операций);

3 – система технологических процессов, выполняемых на производственном участке (отделении);

4 – система технологических процессов, выполняемых в пределах цеха (в системе участков);

5 – система технологических процессов, выполняемых в пределах группы однородных цехов;

6 – система технологических процессов, выполняемых в пределах предприятий (в системе групп цехов);

7 – система технологических процессов, выполняемых в пределах производственных фирм (в системе отдельных предприятий);

8 – система технологических процессов, выполняемых в пределах территориально-экономического региона (в системе отдельных фирм);

9 – система технологических процессов, выполняемых в пределах отрасли промышленности;

10 – система технологических процессов, выполняемых на уровне промышленности всей страны.

Для количественной оценки уровня механизации или автоматизации применяются следующие показатели, рассчитываемые по времени живого труда:

$$У_{\text{т}}^{\text{м(А)}} = \frac{\sum T_{\text{н}}^{\text{м(А)}}}{\sum T_{\text{ш}}},$$

процесса

$$У_{\text{п}}^{\text{м(А)}} = \frac{\sum T^{\text{м(А)}}}{\sum T_{\text{ш}}},$$

и объемам работ (эрготический показатель):

$$У_{\text{эг}}^{\text{м(А)}} = \frac{\sum A^{\text{м(А)}}}{\sum A^{\text{м}} + \sum A_{\text{р}}},$$

где $\sum T_{\text{н}}^{\text{м(А)}}$ – сумма машинного (*А* – при автоматизации) времени, не перекрытого ручным временем, мин.,ч; $\sum T^{\text{м(А)}}$ – сумма всего машинного времени, мин.,ч; $\sum T_{\text{ш}}$ – сумма всех штучных времен, мин., ч; $\sum A^{\text{м(А)}}$ – сумма полезной работы машин, кВт/ч; $\sum A_{\text{р}}$ – сумма полезной ручной работы людей кВт/ч.

Возможно использование для этой оценки условных показателей уровня, рассчитываемых, например, по формуле

$$У_{i\text{р}}^{\text{м(А)}} = \frac{N_i^{\text{м(А)}}}{\sum N_i},$$

где $N_i^{\text{м(А)}}$ – число рабочих, труд которых механизирован или автоматизирован; $\sum N_i$ – общее число рабочих, участвующих в выполнении анализируемых процессов.

С учетом размаха числовых значений показателей уровня механизации или автоматизации выделяют восемь возможных категорий:

нулевая – при отсутствии механизации или автоматизации;
низшая – при основном показателе уровня от 0,01 до 0,25;

малая	>>	св. 0,25 >> 0,45;
средняя	>>	0,45 >> 0,60;
большая	>>	0,60 >> 0,75;
повышенная	>>	0,75 >> 0,90;
высокая	>>	0,90 >> 0,99;
полная	>>	0,99 >> 1,0.

В условиях научно-технического прогресса исключительно важное значение имеет предвидение и учет всех последствий, к которым может привести материальное воплощение научной и инженерной мысли, развитие того или иного нового технического средства или новой технологии его изготовления. Наибольшему обсуждению за последние годы подвергаются экологические последствия научно-технического прогресса. Поэтому все острее ощущается необходимость в научно обоснованном, подлинно рациональном природопользовании, взаимодействии человека со средой обитания. Более того, все отчетливее выступает потребность в экологической направленности научно-технического прогресса.

Появилась настоятельная необходимость радикальных изменений и в отношениях инженера-проектировщика – творца новой техники и технологии с окружающей средой. Инженер-проектировщик должен четко представлять, что при создании новых технологий формируется так называемая техносфера, которая вместе с человеком и биосферой образуют экосферу, все больше превращающуюся в замкнутый комплекс. Под техносферой следует понимать всевозможные технические средства и технологии (здания, сооружения, коммуникации), воздействующие на человека в условиях производства и за его пределами.

На наших глазах и при нашем участии в техносфере происходят различные по своим последствиям изменения, негативно воздействующие на человека, в том числе и на создателя новой технологии. Поэтому решаемые инженером-проектировщиком задачи должны обеспечивать выполнение критериев социально-технической адекватности как условий человеческого существования и развития. Главная особенность технологий, в широком понимании этого слова, состоит в их действии, направленном на удовлетворение потребностей человеческого общества в продуктах труда. Принципиальная схема внешних связей технологий при

системном подходе предполагает изъятие из природной среды и потребление определенного количества природных ресурсов в виде массы различных веществ и энергии, их переработку в продукцию, необходимую потребителю, и производственные отходы сырья (материалов, воды, воздуха) и энергии, а также отходы ресурсов, связанные с необходимостью ликвидации использованных обществом или невостребованных продуктов и самого производства после завершения его жизненного цикла (от момента начала проектирования до ликвидации).

Процесс получения и отдачи веществ и энергии должен быть сбалансированным, иначе нарушается равновесие в природе. Важной проблемой, порождаемой научно-техническим прогрессом, становится создание экологически безвредных производств.

Эта проблема, как следует из схемы, приведенной на рис. 1.7, может быть решена либо за счет сокращения использования природных ресурсов (сырья и энергии), например путем уменьшения масштабов производства, либо за счет сокращения или полного исключения невозвратных отходов тех же ресурсов, например путем организации замкнутых производственных циклов и создания малоотходных или безотходных производств, а также за счет очистки вредных невозвратных отходов (выбросов). Однако к выбору пути следует подходить только после тщательного эколого-экономического анализа, так как необходимо определить допустимый уровень загрязнений и допустимый уровень затрат на их предотвращение с учетом экономии от снижения ущерба и повышения затрат на создание новой безотходной технологии.

На основании изложенного можно выделить следующие характеристики экологических свойств технологического процесса:

- полная энергоемкость;
- коэффициент полезного действия по отдельным операциям и процесса в целом;
- материалоемкость по основным материалам;
- материалоемкость по вспомогательным материалам;
- расход воды (водоемкость);
- коэффициент использования отходов по основным, вспомогательным материалам, ресурсам воды;
- степень токсичности невозвратных отходов и возможность их утилизации и др.

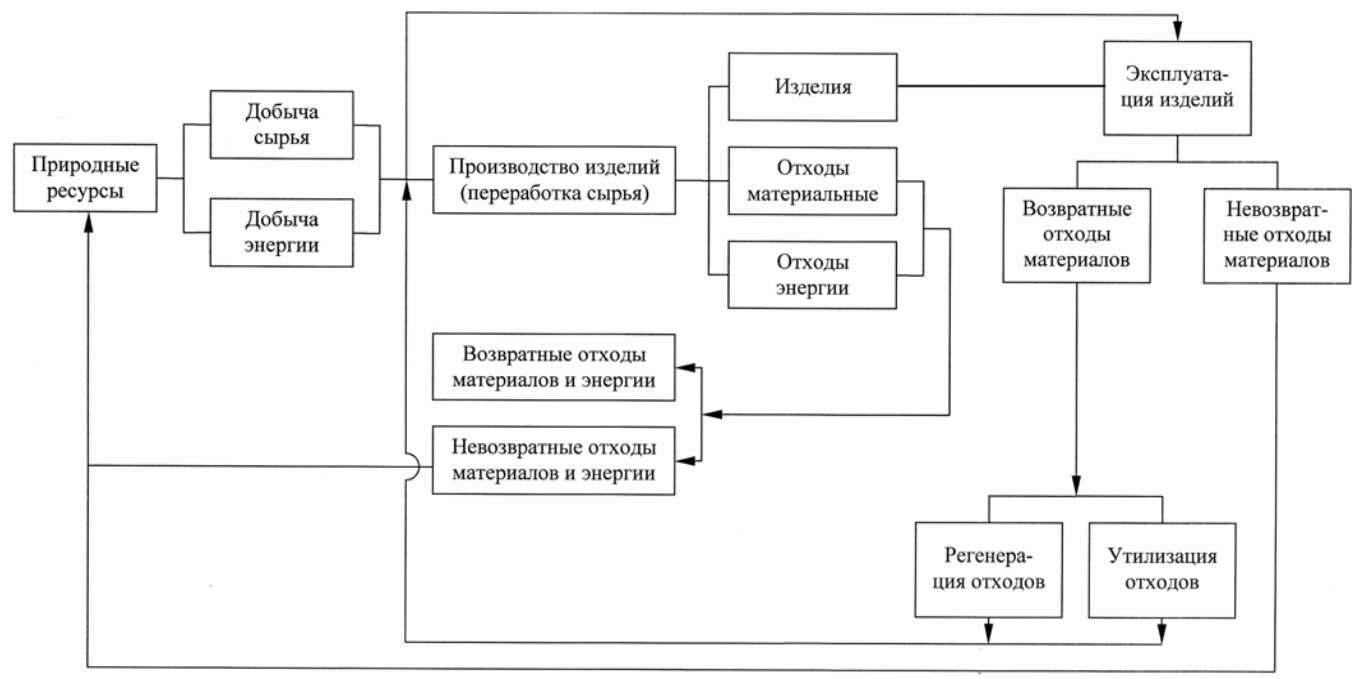


Рис. 1.7. Схема расхода потребляемых ресурсов в пределах жизненного цикла существования изделия

Коэффициент полезного действия характеризует потери одной из основных составляющих природных ресурсов – энергии. Отметим, что из всех видов промышленного производства энергетическое в наибольшей степени связано с воздействием на окружающую среду. Особенно это касается наиболее универсального, удобного в использовании и комфортного вида энергии – электроэнергии. Доля ее в общем балансе энергетического производства довольно велика (для промышленно развитых стран примерно 25%) и постоянно растет. Однако термодинамическая сущность производства и использования электроэнергии заключается в том, что оно в принципе не может быть осуществлено, как следует из закона сохранения энергии, без отвода в окружающую среду значительного и определенного для каждой установки количества тепла. Это тепло, по сути дела, является неизбежным и своеобразным «отходом» энергетической составляющей производства.

Законы термодинамики таковы, что на каждую единицу получаемой полезной энергии в окружающую среду должны быть отведены 2–3 единицы тепловой энергии. Следовательно, электроэнергетическое производство и любое производство с потреблением электрической энергии в любых технических устройствах и установках не может быть полностью безотходным.

Коэффициенты использования материальных отходов характеризуют степень экологической цикличности и совершенства технологического процесса.

Введение системы качественных и количественных показателей позволяет инженеру-технологу объективно оценивать степень экологического совершенства существующих и вновь проектируемых технологических процессов.

Высокие коэффициенты полезного действия и коэффициенты использования материалов характерны для технологических процессов с замкнутым циклом производства, в которых осуществляется многократное полное или частичное возвращение тепловых и (или) материальных потоков в начальную стадию процесса.

1.6. Особенности современного патронного производства

К основным особенностям патронного производства относятся:

1) массовый и крупносерийный тип производства;

2) комплексный характер технологии изготовления изделий;

3) высокая степень технического контроля;

4) высокий технический уровень производства, в том числе высокий уровень механизации и автоматизации;

5) применение обработки давлением, в частности холодной штамповки, в качестве основного метода формообразования изделий;

6) специализация производства.

Необходимость организации массового или крупносерийного производства вызвана потенциальной потребностью армии для обеспечения обороноспособности страны в периоды войн.

О масштабах выпуска патронов стрелкового оружия можно судить по следующим цифрам. Войска, начавшие контрнаступление под Сталинградом в Великую Отечественную войну, имели около 380 млн патронов, а общий расход патронов во время Сталинградской битвы составил около 500 млн (1200 железнодорожных вагонов). В ходе Курской битвы наши войска израсходовали более 500 млн винтовочных и автоматных патронов, 3,3 млн к пулеметам ДШК клб. 12,7 мм и 3,6 млн. клб.14,5 мм для противотанковых ружей ПТРС и ПТРД.

Только за 1942 год патронной промышленностью было изготовлено около 6 млрд патронов. К началу Берлинской операции наши войска имели около 1 млрд патронов, из которых израсходовали почти 390 млн. За 1941–1945 гг. патронная промышленность произвела, а действующая армия целенаправленно израсходовала свыше 17 млрд патронов.

Совершенствование оружия, в частности таких его технических характеристик, как боевая скорострельность и темп стрельбы, и одновременное повышение надежности поражаемой техники сопровождаются увеличением расхода боеприпасов в абсолютном и относительном (на единицу поражаемой цели) измерениях. По сообщениям американской прессы, в 1967 г. войска США во Вьетнаме расходовали в среднем за 1 месяц ведения боев 100 млн патронов.

Однако следует учитывать, что в условиях мирного времени оборонные заказы значительно сокращаются и производство может соответствовать серийному и даже мелкосерийному типу при выполнении спецзаказов и изготовлении опытных партий изделий по планам научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Комплексный характер технологии определяется применением сложных многооперационных процессов на основе различ-

ных по физической природе методов обработки материалов (механической обработки давлением и резанием, термической, химической, электрохимической, термохимической обработки и т.п.). Это связано с необходимостью обеспечения заданного техническими условиями комплекса свойств изготавливаемого изделия (геометрических, металлографических, механических, физических и др.). Технический уровень производства и степень контроля определяются из обязательного эксплуатационного требования к изделиям военной техники – обеспечение высокой (почти 100%-ной) надежности. Следует отметить, что патроны относятся к импульсным устройствам одноразового действия. Поэтому, по сравнению с другими изделиями машино- и приборостроения, нельзя повысить надежность каждого образца за счет замены или регулировки отдельных деталей и узлов. Обеспечение конструкторскими и технологическими методами длительной сохранности изделий в боевых условиях и при хранении на складах также входит в понятие надежности.

При изготовлении патронов использование метода холодной штамповки обусловлено следующими его преимуществами:

- возможностью изготовления металлических элементов сложной конструкции, жестких и прочных, при их минимальной металлоемкости;
- полной взаимозаменяемостью штампуемых деталей;
- высокими экономически целесообразными точностью и качеством штампуемых деталей и изделий в целом;
- потенциально высоким коэффициентом использования металла при его минимальном отходе;
- высокой производительностью процессов штамповки;
- возможностью механизации и автоматизации процессов;
- относительно невысоким отрицательным воздействием процесса производства на экологию окружающей среды;
- низкой трудоемкостью и себестоимостью изготовления штампуемых изделий.

Особенностью патронного производства является его сравнительно узкая специализация. Она определяется специфическими требованиями к этому виду продукции, вытекающими из условий ее функционирования (обеспечение жесткости, прочности, обтюрации, экстракции, кучности, в целом надежности и др.), а следовательно, необходимостью применения специальной комплексной

технологии изготовления и использования готовых изделий, специального технологического оборудования. Реализация такой технологии возможна только при наличии инженерно-технических кадров, имеющих высокую профессиональную подготовку в этой области производства. Отечественный и зарубежный опыт показывает, что производство патронов требуемого качества и в необходимом количестве могут обеспечить несколько современных специализированных патронных заводов. На гражданских предприятиях другого профиля это практически исключено. Узкая специализация патронного производства в значительной степени затрудняет работу предприятий в условиях конверсии, когда государственные оборонные заказы резко сокращаются.

Под военно-промышленной конверсией понимают совокупность взаимосвязанных мероприятий по эффективному использованию научно-технического и производственно-технологического потенциала оборонных отраслей при сокращении военного производства в интересах развития народного хозяйства по производству гражданской продукции при одновременном обеспечении достаточного уровня обороноспособности страны. Этот уровень может быть обеспечен при условии не только сохранения оборонной технологии, но и ее упреждающего развития.

Конверсия может быть полной и неполной. Обеспечение преемственности в технологии и работа по ее совершенствованию при полном или частичном переводе предприятий ВПК на выпуск изделий по плану конверсии и обратно, на выпуск изделий оборонного назначения есть обязательное условие развития оборонных отраслей. Игнорирование этого условия приводит к разрушению накопленного фонда технологий и методов их проектирования, моральному старению ранее созданных технологий, потере профессиональных кадров и, как следствие, к снижению оборонных возможностей страны.

При определении альтернативных направлений конверсии предприятий ВПК следует учитывать сложившуюся структуру производственного процесса, т.е. наличие рассмотренных в подразд. 1.4 фаз (заготовительной, обработочной и сборочной) по основной технологии, а также возможности вспомогательного производства и технической подготовки производства. Конверсия может охватывать все фазы, основные, вспомогательные производственные и непроизводственные технологические процессы, проектно-конструкторско-технологическую подготовку производ-

ства как в совокупности, так и в отдельности.

На основании изложенного можно выделить следующие альтернативные направления конверсии:

1. Производство профильной военной продукции (патронов боевого назначения) для реализации на коммерческой основе в зарубежных странах.

2. Производство профильной продукции гражданского назначения для реализации на коммерческой основе на внутреннем и внешнем рынках (например, спортивно-целевые и охотничьи патроны, патроны к строительно-монтажным пистолетам, пиропатроны к различным устройствам и т.п.).

3. Производство гражданской продукции, технологически подобной выпускаемой профильной продукции.

4. Производство продукции гражданского назначения, технологически не подобной профильной продукции.

5. Использование возможностей вспомогательного производства для изготовления штампов, приспособлений, нестандартного оборудования для изделий различного назначения.

6. Разработка и передача достижений оборонного предприятия в области техники, технологии и материалов двойного применения в гражданские отрасли народного хозяйства и др.

При выборе рациональных направлений конверсии по критерию затрат ресурсов следует учитывать основные компоненты обеспечения производственного процесса:

1) здания и сооружения;

2) коммуникации;

3) оборудование;

4) технологическая оснастка;

5) основные и вспомогательные материалы, топливо, покупные полуфабрикаты, заделы изделий и т.п. (оборотные средства);

6) профессиональные рабочие кадры;

7) профессиональные инженерные кадры;

8) профессиональные управленческие кадры;

9) архив технологических разработок;

10) вычислительный центр и программное обеспечение;

11) научно-исследовательские центры, лаборатории, полигоны.

Очевидно, что первые два направления конверсии (выпуск профильной продукции военного и гражданского назначения) обеспечены всеми перечисленными 11 компонентами производственного процесса, так как сохраняют сложившуюся ранее специа-

лизацию и требуют капитальных вложений, связанных только с повышением конкурентоспособности продукции на мировом рынке.

Представляется рациональной реализация третьего направления конверсии – организация производства непрофильной, но технологически подобной продукции. Технологически подобные изделия, независимо от их функционального назначения, характеризуются одинаковой технологичностью.

Непременным условием конверсии военного производства является недопустимость свертывания научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию новой военной техники и технологии ее производства.

Контрольные вопросы

1. Назовите составные части технологического процесса изготовления выстрела.
2. Изложите на основе системного подхода основные понятия о свойствах объекта технологии.
3. Перечислите состав эксплуатационных свойств объекта технологии и выделите наиболее существенные для патрона.
4. Изложите на основе системного подхода основные понятия о свойствах технологического процесса.
5. Что понимают под структурой технологического процесса? Раскройте содержание понятий «технологический переход», «технологическая операция», «технологический цикл», «этап технологического процесса».
6. Перечислите физические свойства технологического процесса.
7. Раскройте содержание понятия «функция технологического процесса». Назовите основные функциональные свойства технологического процесса.
8. Назовите основные технико-экономические, организационно-социальные и экологические свойства технологического процесса.
9. Составьте обобщенную модель технологического процесса.
10. Перечислите основные особенности современного патронного производства.
11. Назовите основные предпосылки применения метода холодной штамповки в патронном производстве.
12. Раскройте содержание понятия «конверсия» военного производства и назовите возможные альтернативные направления конверсии.

Библиографический список

1. *Агеев Н.П.*, Богатырев А.В., Афанасьев А.С. Технологические основы конверсии военного производства: Учебное пособие / Под ред. Н.П.Агеева; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 1996. 248 с.

2. *Бах И.В.*, Вернидуб И.И., Демкина Л.И. и др. Оружие победы / Под общ. ред. В.Н.Новикова. М.: Машиностроение, 1987. 512 с.

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПАТРОНОВ

2.1. Показатели качества

Под качеством изделия понимают совокупность свойств, обусловливающих его пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии со своим назначением. Количественные характеристики этих свойств называют показателями качества, которые могут выражаться в различных единицах. Различают единичные показатели качества, т.е. по одному из свойств продукции, и комплексные, относящиеся к нескольким свойствам.

При традиционном подходе (см. рис. 1.1) учитывают четыре главные группы свойств, проявляемые в процессах конструирования (конструктивные), изготовления (технологические), эксплуатации (эксплуатационные), сбыта (производственно-экономические).

Тогда вектор свойств объекта технологии можно представить в следующем виде:

$$C_{\text{от}}^{k} = \left\{ C_{\text{э}1}^{k}, C_{\text{э}2}^{k}, \ldots, C_{\text{э}m}^{k}, C_{\text{к}1}^{k}, C_{\text{к}2}^{k}, \ldots, C_{\text{к}n}^{k}, C_{\text{т}1}^{k}, C_{\text{т}2}^{k}, \ldots, C_{\text{т}l}^{k}, C_{\text{эк}1}^{k}, C_{\text{эк}2}^{k}, \ldots, C_{\text{эк}r}^{k} \right\} \tag{2.1}$$

где $C_{\text{э}1}^{k}, C_{\text{э}2}^{k}, \ldots, C_{\text{э}m}^{k}$ – эксплуатационные, $C_{\text{к}1}^{k}, C_{\text{к}2}^{k}, \ldots, C_{\text{к}n}^{k}$ – конструктивные, $C_{\text{т}1}^{k}, C_{\text{т}2}^{k}, \ldots, C_{\text{т}l}^{k}$ – технологические, $C_{\text{эк}1}^{k}, C_{\text{эк}2}^{k}, \ldots, C_{\text{эк}r}^{k}$ – производственно-экономические свойства изделия; k – уровень членения изделия.

Согласно изложенному подходу можно сформировать номенклатуру основных групп показателей качества изделий.

К группе основных эксплуатационных показателей относятся показатели назначения, надежности и безопасности.

К показателям назначения относятся показатели качества функционирования технической системы, отражающие степень ее приспособленности к выполнению основных функций. Вид показателя качества функционирования и его значение во многом определяются целью, которую стремятся достичь при создании 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 27.002-83. Показатели безотказности характеризуют свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки. Показатели долговечности характеризуют свойства объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Показатели сохраняемости характеризуют свойство объекта сохранять исправное и работоспособное состояние в течение и после хранения (или) транспортирования. Применительно к несущим тонкостенным конструкциям, в том числе металлическим элементам патронов, требование безопасности является главным и первостепенное значение имеют показатели назначения и надежности. При определении показателей назначения рекомендуется выбирать для анализа, сопоставления и других операций, обусловленных оценкой уровня качества, самые необходимые конструктивные свойства, например, прочностные характеристики материала элемента изделия. Выбор номенклатуры показателей качества может быть выполнен в соответствии с ГОСТ 22851-77, в котором приведен перечень наименований количественных характеристик свойств, входящих в содержание понятия качества и обеспечивающих возможность оценки уровня качества.

Методы выбора необходимой и достаточной номенклатуры показателей качества устанавливаются также в отраслевых стандартах и методиках.

Конструктивные свойства (показатели конструктивных свойств различной физической природы): геометрические, механические, физико-химические и другие – служат 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), характеризующим его пригодность к изготовлению, эксплуатации, восстановлению и ремонту при обязательном обеспечении его эксплуатационных свойств. Их систематический анализ изложен в последующих разделах.

При анализе возможностей технологического обеспечения качества и надежности изделий принимаем 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 изготовления конечного продукта, его хранения, эксплуатации, возможной стадии восстановления и ремонта;
- накопление количественных изменений характеристик объекта технологии приводит к определенным изменениям состояния и, 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 металла (деградация структуры металла, появление в нем внутренних напряжений сопровождается, как следствие, непрерывным образованием и ростом при пластической деформации микронесплошностей в виде микротрещин и микропор и при их критическом объеме – разрушением металла).

Состав показателей назначения и надежности патронов определяется видами требований по обеспечению следующих качеств оружия: баллистических, боевых и производственно-экономических.

Основные баллистические качества оружия характеризуются настильностью траектории, начальной скоростью пули, наибольшим давлением пороховых газов, пробивным, убойным, останавливающим действием, величиной рассеивания пуль.

Боевые качества оружия в основном характеризуются массой и относительными размерами оружия и патронов, скорострельностью.

Под настильной траекторией понимается траектория с наибольшей дистанцией прямого выстрела. Дистанция прямого выстрела есть дистанция, при которой траектория поднимается настолько, что на всем своем протяжении не превосходит высоты цели. Дистанция прямого выстрела для всех пуль классической схемы увеличивается с повышением начальной скорости пули, улучшением ее формы (баллистического коэффициента), увеличением поперечной нагрузки (отношение веса пули к площади поперечного сечения), уменьшением импульса отдачи.

Под импульсом отдачи понимают импульс силы, сообщаемой системе «оружие – стрелок» в момент выхода из канала ствола пули и пороховых газов. Оптимальной величиной импульса отда-

чи для ручного автоматического оружия является его значение в диапазоне 4…5 нс (0,4…0,5 кгс). Пробивную способность пули оценивают по удельной энергии, под которой подразумевается отношение кинетической энергии пули к площади ее поперечного сечения. Считается, что обыкновенная пуля обладает достаточной для поражения типичных целей пробивной способностью, если ее удельная энергия на дистанции эффективной стрельбы составляет 400 Нм/см^2 (40 кгм/см^2) и выше. Убойное действие пули определяется по области поражения. С увеличением скорости, калибра и способности пули к деформированию, а также с уменьшением ее устойчивости при движении внутри тканей организма убойность пули увеличивается. Для поражения живой цели необходим общий запас кинетической энергии 0,8…1,0 Дж (8…10 кгм). Величина рассеивания пуль характеризуется вертикальным и горизонтальным отклонениями от центра группирования и зависит от постоянства баллистических характеристик патрона, начальной скорости, максимального давления, импульса отдачи и качества технологического исполнения патрона.

Боевые качества стрелкового оружия в общем случае улучшаются с уменьшением его массы. Она зависит от массы патрона и снижается с уменьшением максимального давления p_{max} и с улучшением конструкции гильзы. Чем меньше масса патрона и его габариты, тем больше носимый солдатом боекомплект и лучше условия ношения патронов и обращения с ними в бою.

Под темпом стрельбы понимается предельное число выстрелов в минуту при непрерывном огне. С уменьшением длины патрона и его массы темп стрельбы повышается, так как уменьшаются длина хода подвижных частей автомата и их масса. Для получения наилучших баллистических и боевых качеств оружия патрон должен быть легким, малогабаритным, обеспечивающим требуемую настильность траектории, малый импульс отдачи и невысокие значения давления пороховых газов в канале ствола, а также стабильность баллистических характеристик. Кроме того, патрон должен быть прочным, чтобы противостоять механическим воздействиям на него в боевых условиях.

Патрон должен выдерживать достаточно большие усилия (удары) при работе автоматического оружия и в самом оружии. Качество, форма, размеры патрона должны способствовать бесперебойности действия оружия. Он должен противостоять изменению атмосферных условий и сохранять свои баллистические характе-

ристики. Его конструкция должна обеспечивать безопасность при хранении, перевозке, подготовке к выстрелу, снаряжении магазинов и т. д.

К производственно-экономическим требованиям относятся невысокая стоимость и недефицитность материалов, применяемых для изготовления элементов патронов и патронов в целом, технологичность конструкции патрона и его элементов.

С учетом массового характера производства и большого расхода боеприпасов во время войны снижение стоимости материалов и обеспечение потребности в них отечественным сырьем представляют исключительно важное народнохозяйственное значение. При этом первостепенной задачей является снижение расхода металлов, в особенности цветных металлов и сплавов (меди, латуни, свинца).

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 патронов.

Изготовление патронов стрелкового оружия осуществляется в соответствии с чертежами и техническими условиями (ТУ). Чертеж патрона – это комплект чертежей элементов и самого патрона, а также перечень материалов и условий, обеспечивающих качественное изготовление патронов. Неотъемлемым дополнением к чертежу патрона являются ТУ на изготовление и приемку патрона и его элементов, на материалы и условия выполнения отдельных технологических процессов.

Чертежи и ТУ составляются в соответствии с основными положениями Государственной системы стандартизации, Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и техническими условиями на чертежи предметов вооружения и технического снабжения Главного артиллерийского управления.

2.2. Методы определения и оценки уровня показателей качества

В общем случае различают следующие основные методы определения показателей качества (ГОСТ 15467-79):

• экспериментальный (измерительный) – с применением технических средств исследования и измерения;

• расчетный – с использованием теоретических или эмпирических зависимостей показателей качества от основных параметров;

• регистрационный – на основе наблюдения и подсчета числа определенных событий, предметов или затрат.

Кроме того известен также метод опросов: органолептический, экспертный, социологический.

При оценке уровня качества продукции вначале формируют цель этой оценки и выбирают номенклатуру показателей качества. Затем выбирают аналог продукции – «базовый образец», имеющий одноименные показатели качества, и назначают метод сравнения их значений. По результатам сравнения делают выводы и принимают решение о достигнутом уровне качества продукции.

Уровень качества характеризуют либо совокупностью относительных показателей качества, либо отношением значения обобщенного показателя качества к соответствующему значению показателя аналога (базовому значению), либо отнесением продукции к определенным категориям качества.

Когда рассматривают совокупность базовых показателей за исключением экономических, то говорят о техническом уровне, а при включении экономических показателей – о технико-экономическом уровне продукции.

Для оценки качества применяют дифференциальный метод с использованием единичных показателей; комплексный метод с использованием комплексных показателей; смешанный метод, основанный на одновременном применении единичных и комплексных показателей качества; статистический метод.

Нормирование требований к качеству производят путем установления в нормативно-технической документации регламентированных значений показателей качества. Нормирование требований к качеству конструкций осуществляют с целью обеспечить оптимальный уровень качества в условиях специализации и кооперирования производства (ГОСТ 245252-80).

Единичные показатели качества выражают отдельные свойства контролируемого объекта.

Оценка уровня качества дифференциальным методом выполняется для заданных условий путем сопоставления единичных показателей качества продукции с единичными показателями качества эталона или с базовыми, нормативными показателями.

Выбор базовых показателей зависит от цели оценки уровня качества (при аттестации, выборе наилучшего варианта, планировании показателей качества, контроле качества, анализе динамики уровня качества).

Дифференциальный метод широко используют для оценки прочности детали. Например, применяют показатели качества, представляющие отношение характеристик прочности наклепанного или термически обработанного сечения к соответствующим характеристикам основного материала в исходном, отожженном состоянии:

$$Y_i = x_{ic}/x_{im}, \qquad (2.2)$$

где x_{ic} – нормированная характеристика; x_{im} – характеристика основного материала.

Обычно нормируют характеристики по наименьшему $x^{н}_{ic}$, наибольшему $x^{в}_{ic}$ или наибольшему и наименьшему значениям:

$$x_{ic} \le x^{в}_{ic};\ x_{ic} \ge x^{н}_{ic};\ \ x^{н}_{ic} \le x_{ic} \le x^{в}_{ic}, \qquad (2.3)$$

Установленные предельные значения отражают конкретный опыт. Эффективнее их назначить на основе выявленных статистических закономерностей.

Ограничения величины Y_i (2.2) задаются в зависимости от конкретных технических требований. Выход за установленные ограничения интерпретируется как отказ. Показатели (2.3) и (2.2) соответственно можно рассматривать как абсолютный и относительный, где x_{ic} – единичный, а x_{im} – базовый показатели качества.

Комплексный метод оценки уровня качества применяется в тех случаях, когда для обоснования рекомендаций по принимаемым решениям целесообразно характеризовать уровень качества показателем, выражаемым одним числом или одной совокупностью чисел, т.е. комплексным показателем.

Комплексный показатель характеризует совместно несколько (группу) простых свойств или одно сложное свойство продукции, состоящее из нескольких простых.

Применяют различные варианты комплексного метода.

1. Выделяют главный определяющий показатель, характеризующий основное назначение изделия. Если определяющий показатель комплексный, его называют обобщенным. С применением аналитических функциональных зависимостей вычисляют значение обобщенного показателя качества оцениваемой продукции в зависимости от единичных показателей и сопоставляют с соответствующим значением для аналога (базовым значением). Напри-

мер, для гильзы патрона определяющим параметром может служить критическое избыточное внутреннее давление, при котором нарушается ее прочность.

Известны теоретические функциональные зависимости этого показателя от единичных показателей: относительной толщины оболочки S/D, модуля нормальной упругости материала E, коэффициента Пуассона μ, условий закрепления λ и др., т. е. $q_{кр} = f(E, S/D, \mu, \lambda, \ldots)$.

Базовые (нормативные) значения избыточного давления заданы техническими требованиями в конструкторской документации.

2. Обобщенный показатель качества определяют методом среднего взвешенного арифметического и вычисляют по формуле

$$K_{об} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} q_j k_j,$$

где k_j – показатель j-го свойства изделия; q_j – коэффициент весомости показателя $k_j (\sum_{j=1}^{n} q_j = 1)$; n – число единичных показателей, включаемых в обобщенный показатель качества.

При различной размерности единичных показателей k_j значения показателей выражаются в баллах. Значения коэффициентов весомости q_j и система балльной оценки устанавливается экспертным методом.

Показатель $K_{об}$ и все комплексные показатели, вычисляемые методами среднего взвешенного (арифметического, геометрического и т.д.), представляют собой условную величину, выражаемую в условных единицах, например в баллах, и реального физического содержания не имеют. Этот вариант комплексного метода применяют для оценки качества продукции в тех случаях, когда не удается построить функциональную зависимость исходя из основного назначения изделия.

В качестве примера применения этого метода рассмотрим экспертную оценку технологической эффективности нескольких изделий – пуль.

Оценка технологической эффективности выполнена по критерию технологичности конструкции изделия (ТКИ) и эффективности технологического процесса изготовления изделия.

За критерий ТКИ принята балльная оценка по комплексному показателю

$$\overline{\Pi}_{\text{т}\Sigma} = \sum_{j=1}^{n} \Pi_{\text{т}j} q_j, \qquad (2.4)$$

где $\overline{\Pi}_{\text{т}\Sigma}, \Pi_{\text{т}j}$ – комплексный и частный показатели технологичности, выраженные в баллах (принята трехбалльная система оценки, при наилучшей оценке 3 балла); j – порядковый номер показателя; q_j – весовой коэффициент частного показателя ($\sum_{j=1}^{n} q_j = 1$).

Произведение $\Pi_{\text{т}j} \cdot q_j$ определяет так называемый «взвешенный» балл. Весовые коэффициенты (индексы значимости) q_j устанавливаются методом экспертных оценок, например на основе анализа значимости отдельных затрат в структуре себестоимости.

Общий уровень ТКИ определяется по отношению к изделию, принятому за базовый вариант:

$$K_{\text{ут}} = \frac{\left(\overline{\Pi}_{\text{т}\Sigma}\right)_{\text{оп}}}{\left(\overline{\Pi}_{\text{т}\Sigma}\right)_j},$$

где $\left(\overline{\Pi}_{\text{т}\Sigma}\right)_j$ – значение показателя изделия, принятого для сравнения.

Оценка эффективности технологического процесса выполняется по аналогичной методике, но с применением своих частных показателей.

Корректная постановка задачи оценки технологической эффективности должна предполагать сопоставление изделий одного функционального назначения. Совмещение нескольких функций в одном изделии может рассматриваться как технологическое преимущество.

Предлагаемая система экспертной оценки устанавливает технологическую эффективность обеспечения основных заданных функций поражения целей (бронепробиваемости, воспламеняемости и др.). С этой целью введен показатель относительной цены обеспечения функционального назначения изделия:

$$\frac{\text{Ц}_{\text{оп}}}{\text{Ц}_i} = \frac{\left(\Pi_{\text{т}\Sigma}\right)_j}{\left(\Pi_{\text{т}\Sigma}\right)_{\text{оп}}}, \qquad (2.5)$$

где $\text{Ц}_{\text{оп}}$, Ц_i – цены опытного и сравниваемого изделий.

В табл. 2.1 приведен расчет принятых показателей для четырех типов изделий включая опытное (ОП-4).

Из анализа данных следует, что с учетом необходимости обеспечения основных заданных функций изделия опытный образец превосходит по показателю технологической эффективности все сравниваемые образцы штатных изделий по изделию №1 более чем в два раза.

В рассмотренных выше методах оценки уровня качества по определяющим (обобщенным) показателям нет четких правил выбора базовых значений. Связанных с этим трудностей можно избежать при использовании диаграмм экстраполяции временных оценок качества продукции.

Диаграмма экстраполяции представляет собой график, по вертикальной оси которого откладывают значения показателей качества, по горизонтальной – год выпуска продукции или значения другого признака качества. На этот график наносят в виде отдельных точек данные ряда однотипных изделий, выпускаемых различными предприятиями в различных странах, и аппроксимируют графическую зависимость определенной функцией.

Параметры аппроксимирующих кривых могут быть определены по методу наименьших квадратов. Согласно этому методу минимизируют суммы:

$$I = \sum_{j=1}^{k} \left[\varphi_i(x_j) - P_{ij} \right]^2 = \min,$$

где x_j – год выпуска j-го образца; P_{ij} – значение i-го показателя качества j-го образца (j = 1, 2,..., k); φ_i, (x_j) – функция, аппроксимирующая кривые; k – количество учитываемых образцов изделий.

Временные диаграммы экстраполяции используют следующим образом. По значению P_i i-го показателя качества оцениваемой продукции находят экстраполяционный год ее выпуска (x_j), соответствующий данному качеству.

Сопоставление фактического года $x^{ф}_j$ создания изделия (определенного предприятия, фирмы страны и т.п.) и экстраполяционного $x^{э}_j$ позволяет сделать заключение о его качестве, прогрессивности. Если выполняется условие $x^{э}_j \leq x^{ф}_j$, продукция удовлетворяет или превосходит по определяющему показателю, например, мировой технический уровень. В противном случае технический уровень создаваемого изделия не соответствует современному уровню проектирования и производства в этой предметной области народного хозяйства.

2.3. Выбор критериев нарушения работоспособности

2.3.1. Основные термины и определения

Одна из наиболее актуальных проблем повышения качества изделий – оптимизация технологических процессов изготовления ответственных нагруженных деталей с учетом обеспечения основных эксплуатационных требований. Для обеспечения нормальных условий эксплуатации конструкции первостепенное значение имеют показатели надежности и их связь с показателями качества, используемыми на стадии изготовления. Надежность есть свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, восстановления и ремонта. Определение надежности в государственных стандартах дано применительно к объектам, под которыми понимаются предметы определенного целевого назначения. Объектами могут быть изделия, системы, их элементы и т. д. Элементами называются наименьшие конструктивные единицы. К ним, например, можно отнести гильзы, оболочки, пиростаканы и др., а также их отдельные конструктивные элементы (дульце, скат, корпус, дно, фланец и т.п.).

Надежность – сложный (комплексный) показатель, сочетающий свойства безотказности, долговечности и восстанавливаемости. Для оценки надежности важное значение имеют понятия работоспособного состояния и отказа, а затем характер и причины отказов. За работоспособное состояние (далее – работоспособность) элемента принимается такое состояние, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения их характеристик в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Тогда событие, заключающееся в нарушении работоспособности элемента выходом хотя бы одной его характеристики за допустимые пределы, квалифицируется как отказ. Признаки, устанавливающие нарушение работоспособного состояния, являются критериями отказа.

В соответствии с изложенным безотказность определяется как свойство изделия (элемента изделия) непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени – наработки; долговечность – свойство изделия (элемента изделия) сохранять рабо-

тоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. За предельное состояние принимают такое состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно.

Ремонтопригодность (восстанавливаемость) есть свойство изделия, заключающееся в способности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонта. Применительно к патронам как изделиям разового применения это свойство неактуально.

Каждая из выделяемых составляющих надежности (безотказность, долговечность, восстанавливаемость) тесно связана с некоторой величиной, имеющей размерность времени (соответственно $t_б$, $t_д$, $t_в$). Их именуют характеристическими случайными величинами. Для восстанавливаемых объектов $t_б$ есть время между отказами. Время $t_д$ может исчисляться либо как полное (календарное) время работы объекта технологии (срок службы $t_{сс}$), либо как чистое время (ресурс $t_с$). При количественном описании надежности изделий и их элементов описание составляющих надежности отождествляется с описанием соответствующей характеристической величины, а методы расчета изложены в действующей нормативно-технической документации и специальной литературе.

2.3.2. Критерии отказов

Критерии отказов обусловлены многими причинами, в том числе воздействием внешних факторов.

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.

Источники исходной информации для технолога:

- анализ чертежей изделия, технических условий, описания устройства, инструкций по его эксплуатации;
- совещания с конструкторами, ознакомление с результатами их расчетов и испытаний при отработке опытной конструкции или ее аналогов;
- совещания с эксплуатационниками, с работниками служб надежности и ремонта изделий;
- собственные предварительные технологические и натурные испытания 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, влияющим на эксплуатационные свойства патронов и на возможность появления отказов при их функционировании, относятся следующие:

- 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, их 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 существенно влияет технология сборочных операций. Отклонения от заданных диаметральных и линейных размеров гильзы и патрона, возникающие на штампо-

вочных операциях (вытяжке, штамповке дна, обжиме гильзы и патрона), могут привести к неполному вхождению патрона в патронник с вызовом «недокрытия» или к провалу патрона в патронник с возможным появлением осечек. При изготовлении гильз с заниженными прочностными и повышенными пластическими свойствами возможны 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 или после обжима. 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 возможны демонтаж или даже потеря устойчивости гильзы патрона при неудовлетворительных режимах проведения технологических операций по изготовлению и капсюлированию гильз, при 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 по окружности капсюльного гнезда.

Демонтаж патрона может произойти и вследствие выпадения пули при досылании патрона в патронник в момент ударного торможения в автоматических 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.

Вид деформации при ударном торможении зависит от способов торможения при посадке патрона в патроннике (ударом буртика, ската закраины, бурта-ската и др.). Из условия равенства работ внешних и внутренних сил в момент торможения следует, что для повышения надежности от распатронирования должно выполняться условие $A_з \leq A_{изв}$, где $A_з$ – работа деформирования закраины; $A_{изв}$ – работа, затрачиваемая на извлечение пули. При

этом $A_з = A_{уд} \cdot V_з$, где $A_{уд} = \int\limits_0^{\varepsilon_i} \sigma_i d\varepsilon_i$ – удельная работа формоизменения металла закраины; V – пластически деформируемый объем металла закраины; $\sigma_i = f(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$ – сопротивление деформированию металла в зоне закраины, например при использовании аппроксимации в виде степенной функции $\sigma_i = A\varepsilon_i^n \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{\dot{\varepsilon}_{i0}} \right)^m \approx AK_v\varepsilon_i^n$,

где A, m, n – константы материала; $\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i$ – интенсивность деформации и скорости деформации соответственно; K_v – коэффициент динамичности.

Величина работы, затрачиваемой на извлечение пули, будет равна: $A_{изв} = \pi dfq \int\limits_0^l dl$, где d – внутренний диаметр дульца; q – удельное контактное давление натяга на поверхности сопряжения гильзы и ведущей части пули; f – коэффициент трения; l – длина участка сопряжения пули и дульца гильзы.

Величина контактного давления будет зависеть от предела текучести материала дульца готовой гильзы $\sigma_s^д$, от интенсивности деформации в зоне дульца $\varepsilon_i^д$ при обжиме патрона, от относительной толщины стенки дульца $S^д / d_{ср}$ ($d_{ср} = d - S^д$ – средний по толщине диаметр дульца, d – его наружный диаметр).

Из приведенных соотношений следует, что на устойчивость от распатронирования большое влияние при заданных конструктивных характеристиках патрона оказывают механические свойства металла гильзы в зонах закраины ($\sigma_i^з$) и дульца ($\sigma_i^д$), соотношение этих характеристик ($\sigma_i^з/\sigma_i^д$), скорость досылания $\upsilon_д$ (коэффициент динамичности K_v), состояние поверхности контакта дульца гильз и пули (f). Распатронирование возможно при повышенной жесткости закраины ($\sigma_i^з/\sigma_i^д > 1$) и невысоких значениях f. Повысить надежность от распатронирования можно при применении смятия ската в процессе торможения патрона. В этом случае механические свойства ската гильзы обеспечиваются подбором соответствующих режимов прессовой и термической обработки.

Одним из основных факторов повышения надежности от распатронирования является повышение минимального предела пу-

леизвлекающего усилия $P_{изв}$. Надежность скрепления гильзы 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 существенно влияет на величину $P_{изв}$ технология операций обжима и отжига дульца, так как в зависимости от режима их проведения 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 натяга.

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, ухудшению условий 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 рассевание пуль.

При выборе способа крепления пуль выбирают тот, который обеспечивает наибольшую работу по извлечению 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 несрабатыванию патрона при выстреле, т.е. 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 оказывает технология изготовления металлических элементов патрона, главным образом, технология процессов штамповки и термообработки, качество исходного металла.

Чтобы обеспечить надежную экстракцию, необходимо получить большую упругую разгрузку нижней части корпуса гильзы после выстрела, величина которой определяется прежде всего величиной тангенциальных напряжений, действующих в стенках гильзы. Последние будут тем выше, чем выше значения предела текучести материала нижней части корпуса гильзы. Величина предела текучести готовой гильзы, в свою очередь, зависит как от свойств материала исходной заготовки, так и от условий последующей термомеханической обработки этого материала (накопленной степени деформации на штамповочных операциях, режи-

мов термической обработки). Чтобы обеспечить достаточную жесткость дна и избежать его отрицательного влияния на деформацию нижней части корпуса, дно гильзы должно обладать высокими упругими свойствами, определяемыми принятыми технологическими схемами штамповки дна, характером распределения по его сечению и величиной степени деформации. Как известно из практики эксплуатации стрелкового оружия, поперечные разрывы гильз возникают в редких случаях. Этот отказ относится к виду совершенно недопустимых, 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 иметь место 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.

Из приведенного неравенства следует, что на поперечную прочность влияют давление пороховых газов на дно гильзы и патронник, механические свойства материала гильзы, геометрические параметры гильзы и патронника, величина зеркального зазора и деформация узла запирания. Очевидно, что при незаклинивании гильзы по длине силами трения опасность поперечного обрыва не возникает. На состояние поверхности гильзы влияет технология нанесения антикоррозионного покрытия. При некачественном покрытии возможно увеличение коэффициента трения и в результате – ухудшение условий функционирования патрона.

На обеспечение условия продольной прочности от действия продольных сил гильзы в опасном сечении существенно влияет технология изготовления гильзы и, в частности, реализуемая схема формирования механических свойств (прочности и пластичности) в этом сечении. Условие продольной прочности в тер-

минах 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, тогда как 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 $e^j_{i\text{эф}} = e^j_i\,(1 - K^j_{\text{т}})$, где $K_{\text{т}}$ – коэффициент, учитывающий влияние термической обработки на разупрочнение деформированного металла. Эксплуатационная поврежденность металла описывается аналогичным соотношением

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

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.

Отклонения в режимах термомеханической обработки верхней части гильзы может привести к заклиниванию большей части ее поверхности, 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 характеристик механических свойств оказывает разностенность деталей, т.е. разнотолщинность по периметру сечения.

Одним из видов технических отказов является возникновение на гильзах продольных трещин во время стрельбы, что недопустимо в придонном участке с переходом на проточку и фланец. Прорыв пороховых газов через такие трещины может вызвать опасность ранения стрелка, задержки экстрагирования гильз, поломку деталей автоматики стрелкового оружия. Опыт эксплуатации оружия показывает, что трещины такого рода чаще появляются при стрельбе в условиях низких температур (до –50°С).

Технологические причины появления этого вида отказов:

• 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;

• наличие в металле крупных неметаллических включений порядка 4-5 баллов по шкале эталонов.

При стрельбе из стрелкового оружия наблюдаются иногда случаи: 1) поперечного разрыва оболочки (демонтажа пули) в месте сопряжения головной части с ее ведущей частью; 2) 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 окно хвостовой части в процессе врезания пули в нарезы канала ствола. Условие прочности оболочки: $\sigma_{x_{\max}} < [\sigma] = \sigma_{\text{в}}$, где $\sigma_{x_{\max}}$ – осевые максимальные напряжения, действующие в стенках оболочки в сечении сопряжения ведущей и головной частей пули; $[\sigma]$ – допустимое напряжение.

При этом следует иметь в виду, что

$$\sigma_{x_{\max}} = f\left(\rho_{\text{m}}, \frac{F_{\text{с}}}{F_{\text{о}}}, \frac{F_{\text{п}}}{F_{\text{с}}}, \frac{m_{\text{с}}}{m_{\text{п}}}, f, \frac{h}{d_{\text{с}}}\right),$$

$$\sigma_{\text{в}} = f(e_i, t, \tau),$$

где ρ_m – максимальное давление пороховых газов; $\frac{F_{\text{с}}}{F_{\text{о}}}, \frac{F_{\text{п}}}{F_{\text{с}}}, \frac{m_{\text{с}}}{m_{\text{п}}}, f, \frac{h}{d_{\text{с}}}$ – безразмерные параметры; $F_{\text{с}}$, $F_{\text{о}}$, $F_{\text{п}}$ – площа-

ди поперечного сечения сердечника, оболочки и пули; $m_с$, $m_п$ – масса сердечника и пули; f – коэффициент трения.

Приведенные соотношения свидетельствуют о влиянии конструктивно-технологических параметров пули и ее элементов, режимов и качества технологических процессов изготовления элементов и монтажа пули на возможность появления рассматриваемого вида отказов.

Во втором случае, 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: $\sigma_{ср} < [\sigma]$.

К технологическим факторам, влияющим на обеспечение этого условия, относятся толщина стенки ведущей части пульной оболочки и ее твердость. Увеличение толщины оболочки, а также твердости ее ведущей части может стать причиной срыва пули с нарезов. Это связано с увеличением работы пластической деформации при внедрении выступов нарезов ствола в оболочку и, как следствие, с 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, даже в пределах допуска на толщину и твердость, 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 – до 800…1000 об/с. В результате в оболочке и свинцовой рубашке действуют центробежные силы инерции. Из-за большой плотности свинца и небольшого сопротивления его разрыву давление свинцовой рубашки на оболочку может быть значительным. Существенным является то, 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 записывается аналогично предыдущему случаю: $\sigma_\theta < [\sigma] = 0{,}7...0{,}8\sigma_в$, 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 $(S_{max} - S_{min})/S_0$, механические свойства материала оболочки $\sigma_в$, неоднородность этих свойств в сечении $(\sigma_{в\,max} - \sigma_{в\,min})/\sigma_в$.

На точность и единообразие баллистических характеристик, определяющих величину рассеивания пуль, влияют 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 качества 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 влияют на положение ее центра тяжести. Одним из факторов, определяющим устойчивый и правильный полет пули, является единообразие соотношений полярного и экваториального мо-

ментов инерций, которые зависят, главным образом, от смещения (разброса) центра тяжести пули в осевом и радиальном направлениях.

Величина этого смещения, влияющего на кучность боя, зависит от точности и единообразия следующих параметров пуль:

- 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.

Иллюстрацией к вышесказанному служат результаты оценки кучности боя при различных числовых и качественных значениях конструктивно-технологических параметров (КТП) пули, приведенные в табл. 2.2 по данным К.Т. Макаровой.

Кучность может быть улучшена за счет сокращения разброса положения центра тяжести, повышения точности изготовления элементов пуль и 100%-ного контроля основных размерных параметров полуфабрикатов и готовых элементов.

Таблица 2.2

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

Ограничение допуска по массе осуществляется за счет рассортировки на группы элементов пуль по массе с точностью до 0,022 г и комплектования групп при монтаже с учетом их средней

массы. Этот метод позволяет сократить допуск по массе пуль до 0,05 г. Существенно влияет на кучность плотность монтажа, под которой понимают степень монолитности. Плотность монтажа заключается в получении требуемой формы пули и отсутствии в ней 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.), а также состояние поверхности сопрягаемых элементов пули. Применение графитизации сердечника способствует снижению коэффициента трения при его запрессовке, 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, что 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, от единообразия сопрягаемых диаметральных размеров гильзы и пули, от механических свойств материалов дульца гильзы и ведущей части пульной оболочки, от разностенности дульца, формы накатного пояска и от других факторов. С увеличением разностенности разброс пулеизвлекающих усилий возрастает. Наименьший разброс соответствует разностенности до 0,03 мм.

Некачественность изготовления элементов пули и ее монтажа, низкая твердость бронебойных сердечников, слабая запрессовка пиросостава приводят к неудовлетворительной бронепробиваемости или к несрабатыванию трассирующих или зажигательных пуль.

2.3.3. Конструктивно-технологические параметры, влияющие на качество и работоспособность металлических элементов патронов

Характеристики видов нарушения работоспособности (отказов) металлических элементов патронов можно выделить по следующим признакам:

1. По виду достигаемых при нагружении предельных состояний:

- потеря устойчивости в области упругих деформаций;
- потеря упругости в области малых упруго-пластических деформаций;
- потеря устойчивости в области больших (конечных) деформаций – потеря устойчивости пластического деформирования;
- предразрушение;
- разрушение.

2. По времени возникновения отказов:

- постепенные;
- внезапные.

3. По характеру приложения внешней нагрузки по поверхности оболочки:

- распределенные;
- сосредоточенные (локальные).

4. По характеру приложения внешней нагрузки во времени:

- статические непрерывные;
- статические прерывные (повторно-статические);
- динамические непрерывные;
- динамические прерывные (вибрационные, циклические).

5. По схеме напряженного состояния нагружаемой оболочки (очага предельного состояния):

- линейная (растяжение, сжатие);
- плоская одноименная (двустороннее растяжение или сжатие);
- плоская разноименная (растяжение-сжатие, в частности, сдвиг).

6. По месту расположения очага нарушения работоспособности:

- в зоне корпуса (стенке) детали;

- вне зоны корпуса (стенки) детали (например, в зоне дна, ската, закраины дульца и др.).

7. По температурным условиям эксплуатации:

- при нормальных температурах;
- при повышенных температурах;
- при отрицательных температурах.

8. По виду среды:

- в неагрессивных средах;
- в агрессивных средах.

Основным признаком классификации отказов следует считать вид достигаемого при нагружении предельного состояния металла детали. При определении предельных состояний исходим из общей феноменологической модели поведения металлов при деформировании. Согласно этой модели, любой процесс деформации пластичных металлов делится на пять стадий (рис. 2.1): I – упругое деформирование; II – упруго-пластическое деформирование; III – устойчивое пластическое деформирование; IV – неустойчивое пластическое деформирование; V – разрушение.

Соответственно конец каждой из перечисленных стадий квалифицируется как предельное k–состояние. Ввиду размытости границы между первой и второй стадиями за первое предельное состояние ($k = 1$) принимаем переход от второй к третьей стадии и далее: $k = 2$ – переход от третьей к четвертой, $k = 3$ – от четвертой к пятой, $k = 4$ – завершение стадии разрушения.

С точки зрения термодинамики, изменение состояния деформируемой системы однозначно характеризуется изменением внутренней энергии dU, которое трактуется на основе закона сохранения энергии в следующем виде:

$$dU = \sum_{j}^{N_c} dQ_j, \qquad (2.6)$$

где N_c – число внешних степеней свободы (количество реализуемых при функционировании и (или) обработке материала форм технологического движения); dQ_j – элементарная обобщенная работа (деформационная, термическая, химическая и др.)

Следовательно, элементарное изменение внутренней энергии системы равно алгебраической сумме N_c элементарных работ различного рода, вызываемых реализацией каждой из применяемых частных форм движения, выполняемых в любой последовательности, т.е. подчиняется законам аддитивности и коммутативности.

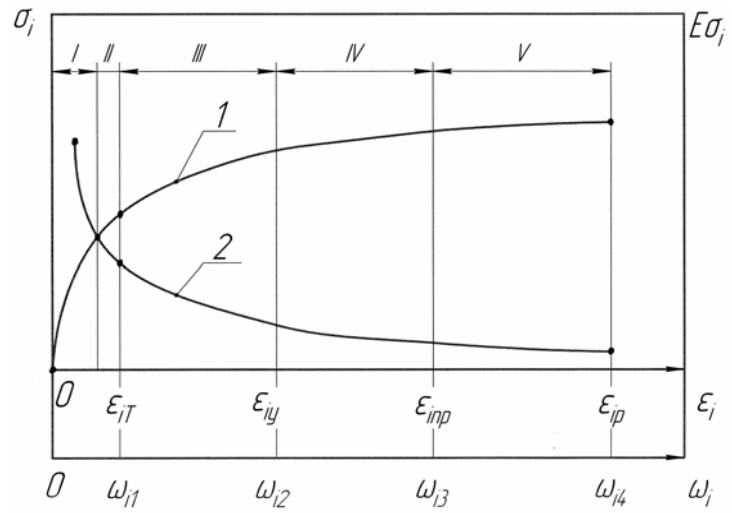


Рис. 2.1. Обобщенная диаграмма предельных состояний деформируемого материала: *1* – $\sigma_i - \varepsilon_i$; *2* – $E_{\sigma_i} - \omega_i$

Обобщенная работа является количественной мерой взаимодействия деформируемой системы и окружающей среды. Накопление количественных изменений обобщенной работы приводит к определенным качественным изменениям деформируемого металла, вызывающим его переход через предельные для определенных условий состояния. Условие перехода через любое предельное k-состояние записывается в следующем виде:

$$Q_{i\Sigma} \geq Q_k \quad (k = 1, 2, 3, 4)\,, \tag{2.7}$$

где $Q_{i\Sigma} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1} Q_{ij}$ – работа, накопленная к моменту перехода за весь предшествующий период деформирования; N – количество этапов деформирования.

Условие (2.7) вытекает из всеобщего закона диалектики о переходе количественных изменений в качественные. Выход за пределы количественных изменений, характерных для деформируемого материала, приводит к нарушению меры, присущей ему на определенной стадии деформирования, а значит, к переходу его в новое качество. Для характеристики состояния материала и его свойств на любой стадии деформирования вводят, кроме величин

интенсивностей напряженного σ_i, деформированного ε_i состояний, показатели, характеризующие интенсивность предшествующего или текущего деформационного упрочнения и степень использования ресурса (запаса) пластичности. Способность металла к деформационному упрочнению оценивают величинами касательного модуля $E_к$, коэффициента упрочнения n и безразмерного показателя деформационного упрочнения $E_{\sigma i}$.

Аппроксимируя диаграмму $\sigma_i - \varepsilon_i$ степенной функцией вида

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^n, \tag{2.8}$$

получим

$$E_{ki} = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} = An\varepsilon_i^{n-1}, \tag{2.9}$$

$$E_{\sigma i} = \frac{1}{\sigma_i}\frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} = \frac{n}{\varepsilon_i}. \tag{2.10}$$

В качестве меры поврежденности материала изделия (элемента изделия), согласно феноменологической теории разрушения, вводится степень использования ресурса пластичности, определяемая для условий холодной деформации по соотношениям следующего вида:

$$\omega_i = \int_0^{e_i} \frac{ae_i^{a-1}de_i}{\left[e_{i\text{р}}(k(e_i)\right]^a} \tag{2.11 а}$$

– нелинейный закон накопления поврежденности металла;

$$\omega_i = \int_0^{e_i} \frac{de_i}{e_{i\text{р}}(k(e_i)} \tag{2.11 б}$$

– линейный закон накопления поврежденности металла, где e_i – степень деформации; $e_{i\text{р}}(k(e_i))$ – предельная до разрушения степень деформации, являющаяся функцией показателя жесткости схемы напряженного состояния $K = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/\sigma_i$, в общем случае являющегося функцией от стадии процесса деформирования и степени деформации; a – коэффициент, характеризующий интенсивность накопления поврежденности и являющийся некоторой функцией от параметров K и v_ε.

Согласно введенному А.А. Ильюшиным понятию степени деформации,

$$e_i = \int_0^{\tau} \dot{\varepsilon}_i d\tau. \tag{2.12}$$

Отсюда

$$\frac{de_i}{d\tau} = \dot{\varepsilon}_i \,, \qquad (2.13)$$

т.е. полная производная степени деформации по времени равна интенсивности скорости деформации. Для монотонных процессов или их этапов выполняется равенство $e_i = \varepsilon_i$ для немонотонных $e_i = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{ii}$, где ε_{ii} – интенсивность деформации на i-й стадии; n – количество стадий.

Коэффициент a в уравнении (2.11) определяется из равенства

$$a = a_0^{1-p/4T} \,,$$

где a_0 – характеристика металла при атмосферном давлении; $p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ – гидростатическое давление; $T = \sigma_i / \sqrt{3}$ – интенсивность касательных напряжений.

При оценке возможной накопленной поврежденности металла изделия (элемента изделия) при функционировании $\omega_{i\Sigma}$ следует учитывать наследование металлом технологической поврежденности $\omega_{i\text{т}}$, т.е. $\omega_{i\Sigma} = \omega_{i\text{т}} + \omega_{i\text{ф}}$, где $\omega_{i\text{ф}}$ – собственно эксплуатационная поврежденность.

Физическая сущность постепенных отказов заключается в наличии медленных необратимых физико-химических процессов, связанных с изменением состава и структуры применяемых материалов, особенностями изготовления и конструкции, с условиями нагружения.

Внезапные отказы характеризуются быстрым протеканием и проявляются, например, в виде потери устойчивости при сжатии, хрупких разрушений, локализации деформации. Момент их наступления является случайной величиной.

К статическим нагрузкам относятся не изменяющиеся или мало изменяющиеся во времени нагрузки, а к динамическим – нагрузки значительной величины, действующие короткое время (ударные, импульсные), а также часто повторяющиеся нагрузки небольшой величины (вибрационные).

Из предшествующего анализа следует, что важнейшим критерием при выборе оптимальных вариантов конструктивно-технологического исполнения металлических элементов патрона следует считать его предполагаемую надежность. В качестве основных показателей надежности могут быть выбраны:

- вероятность безотказного функционирования $P(\tau)$;
- вероятность отказа $F(\tau)$;
- параметр потоков отказов $W(\tau)$;
- средний срок функционирования $\tau_{ср}$.

Наиболее целесообразной характеристикой для решения данной задачи следует считать вероятность безотказного функционирования – вероятность выполнения задания по всей совокупности определяющих нормируемых показателей качества и критериев отказа, так как она охватывает все факторы, включающие погрешности конструирования и технологии изготовления, существенно влияющие на надежность. Оценка надежности функционирования металлического элемента патрона может выполняться по одному или всей совокупности основных нормируемых показателей качества: устойчивости, прочности, уровню поврежденности металла.

Вероятность безотказного функционирования детали, состоящего из N конструктивных элементов, по любому одному из названных показателей качества будет равна:

$$P(\tau) = P_1(\tau)P_2(\tau)...P_n(\tau) = \prod_{i=1}^{N} P_i(\tau)\,. \qquad (2.14)$$

Тогда вероятность отказа изделия

$$F(\tau) = 1 - \prod_{i=1}^{N}\left[1 - F_i(\tau)\right]. \qquad (2.15)$$

При $P_i(\tau) < 0{,}2$ расчет можно вести по формуле

$$F(\tau) = \sum_{i=1}^{N} F_i(\tau)\,,$$

где $F_i(\tau)$ – вероятность отказа каждой детали, входящей в состав изделия. В общем случае, когда нормируется различное число показателей, значения которых попарно независимы, вероятность безотказной работы определяется следующим соотношением:

$$P(\tau) = \prod^{A} P_j(\tau)\prod_{i=1}^{B}\left\{1 - \left[1 - P_i(\tau)\right]\beta_i\right\}, \qquad (2.16)$$

где $A = \sum_{j=1}^{N} C_{нj}$; $B = \sum_{j=1}^{N} C_{кj}$; $C_{нj}$ – количество неконтролируемых параметров; $C_{кj} = C_j - C_{нj}$ – количество контролируемых параметров j-го конструктивного элемента детали; C_j – общее коли-

чество контролируемых параметров детали; β – коэффициент значимости («удельный вес») показателя.

Тогда вероятность отказа изделия при функционировании определяется по формуле

$$F(\tau) = 1 - \prod \left[1 - \sum_{i=1}^{N} F_i(\tau) \right]. \qquad (2.17)$$

Из приведенных соотношений следует, что на вероятность безотказной работы существенно влияет количество нормируемых показателей (возможных видов отказа), количество деталей (элементов деталей, опасных зон), зависящих от физико-механической природы процессов, протекающих при функционировании изделия и его изготовлении. С увеличением числа возможных разнородных технологических и функциональных отказов, а следовательно, числа нормируемых показателей и количества деталей в изделии, вероятность безотказного функционирования, при прочих равных условиях, уменьшается.

В соответствии с выделенными тремя возможными видами функциональных отказов установим три критерия оценки $P_1(\tau)$, $P_2(\tau)$, $P_3(\tau)$ определяющих вероятность безотказной работы. За граничные характеристические значения критерия принимаем $P_j(\tau) < 0{,}1$ ($j = 1, 2, 3$).

Значение $P_j(\tau) = 1$ по любому из принятых видов свидетельствует о невозможности возникновения j-го вида функционального отказа в анализируемой детали, изделии, а нулевое значение ($P_j(\tau) = 0$) – о возможности появления неисправимого дефекта. Промежуточное значение критерия $0 < P_j(\tau) < 1$ свидетельствует о возможности появления этого вида отказа и, как следствие, допустимого или исправимого отклонения качества объекта, регламентируемого техническими условиями на эксплуатацию. Ввиду отсутствия результатов статистического исследования аналогичных объектов и аналитических моделей надежности по указанным критериям может быть разработана система их экспертной оценки с учетом значимости каждого критерия при функционировании.

На основании анализа условий отказа составлены в обобщенном виде модели отказов и выделены геометрические, механические и физические конструктивно-технологические параметры металлических элементов патронов как объектов проектирования и изготовления (табл. 2.3).

Накопленный опыт эксплуатации конструкций изделий различного назначения показывает, что, как правило, их преждевременные повреждения, связанные с «запуском» тех или иных механизмов отказа, происходят при совокупном действии нескольких конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Подчас бывает сложно разделить факторы на чисто конструктивные и технологические, так как один и тот же параметр (например, предел текучести $\sigma_{0,2}$) может определять конструктивное свойство, например прочность оболочки при функционировании, и технологическое – прочность заготовки оболочки при штамповке. Каждый фактор в отдельности в большинстве случаев может не провоцировать какой-либо механизм отказа.

В табл. 2.3 приняты следующие обозначения: σ_{ρ}, $\sigma_{кр}$ – действующие осевые и критические напряжения; $\sigma^{t}_{0,2}, \sigma^{t}_{iy}$ – предел текучести и предельное устойчивое напряжение (интенсивность напряжений в момент потери устойчивости пластического деформирования, определяемое с учетом температуры функционирования); ε_{iy}, e_{iy} – предельная до потери устойчивости интенсивность деформации, определяемая при испытании на растяжение образцов и предельная до потери устойчивости степень деформации; n – показатель деформационного упрочнения металла; $K\sigma_{кр}$, $K\sigma_{iy}$, Ke_{iy}, $Ke_{i\rho}$, $K\omega_{iy}$, $K\omega_{i}$ – коэффициенты запаса прочности; K, $K^{ф}$ – коэффициенты жесткости схемы напряженного состояния в процессах штамповки и при функционировании металлического элемента; q – внутреннее избыточное давление, действующее на металлический элемент при функционировании; f – коэффициент трения; t – температура процессов обработки и функционирования; S/d, δ_s, h/s – безразмерные геометрические параметры (относительные толщина, разностенность и высота), $e_{iт}$, $\omega_{iт}$, $e_{iф}$ $\omega_{iф}$ – степень деформации и коэффициент использования ресурса пластичности при изготовлении и функционировании.

В инженерной практике проектирования конструкций при расчетах на прочность, устойчивость во многих случаях оценка НДС производится на базе упрощенных схем деформирования материала и элементов конструкции, например, в рамках теории упругости с использованием методологии сопротивления материалов, строительной механики, теории оболочек без учета влияния технологии изготовления этих конструкции на их прочность. Такой подход может быть оправдан в отношении конструкций, рабо-

тающих при относительно простых режимах эксплуатации, а также тех, которые проектируют на базе большого количества аналогов и значительного опыта эксплуатации.

Вместе с тем при сложном термосиловом, динамическом, квазистатическом или длительном нагружениях ответственных конструкций, изготавливаемых по сложному технологическому процессу, оптимальное проектирование может быть выполнено только путем решения краевых задач на основе реологических схем, учитывающих различные нелинейные свойства материалов конструкций, зависящие от технологии обработки. Современный уровень методов проектирования и расчета изделий настолько высок, что собственно конструкторские возможности совершенствования изделий без учета технологии ограничены. Наличие таких резервов обусловлено сложностью и многовариантностью технологических процессов. Для каждой детали процесс изготовления включает несколько этапов, технологических циклов, большое число операций, выполняемых различными по физической природе методами и способами обработки, определенным образом влияющими на геометрические и физико-механические свойства изделия.

Поэтому технологию и конструкцию изделия приходится оптимизировать одновременно по нескольким показателям работоспособности нагружаемой детали. Для каждого из них существуют свои, часто совершенно разные, наивыгоднейшие параметры процесса изготовления. Объем работ по оптимизации технологических процессов резко увеличивается, так как сама по себе совокупность технологических факторов еще не определяет прочность, устойчивость возможных опасных зон деталей. Различия форм поверхностей и размеров этих зон, их рабочих температур, а также существенных конструктивных и эксплуатационных свойств могут не только количественно, но и качественно изменить влияние технологических факторов на показатели работоспособности. В свете изложенного проблема оптимизации процесса изготовления деталей и технологического обеспечения их конструкции по показателям работоспособности является многопараметрической и многокритериальной. Имеются два метода решения этой проблемы. Наибольшее распространение получил метод доводки процесса производства подразделениями надежности и технологами предприятия-изготовителя на основании анализа причин аварий, отказов и повреждений изделий при заво-

дских испытаниях и эксплуатации. Метод доводки надежен, но дорог и длителен. Другой метод заключается в использовании технологических и натурных испытаний и исследовании параметров состояния материала, зон возможных повреждений деталей («опасных» зон) для прогнозирования оптимальных вариантов их изготовления еще на стадии проектирования технологии. Одновременно при этом могут определяться и наивыгоднейшие законы адаптивного управления технологическими операциями при их выполнении.

Построенные математические модели зависимости показателей работоспособности (отказов) от технологических факторов концентрируют в себе опыт испытаний. Их легко накапливать в долговременной памяти ЭВМ и использовать при автоматизированном проектировании новых аналогичных операций для типовых элементов конструкции деталей.

2.3.4. Обобщенный алгоритм технологического обеспечения качества и надежности патронов

В основу 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 $x_1(\tau), x_2(\tau),\ldots, x_n(\tau)$ – ее координаты состояния:

$$x(\tau) = (x_1(\tau), x_2(\tau),\ldots, x_n(\tau)). \qquad (2.18)$$

Принимается, что τ имеет дискретные значения: $\tau = 0, 1, \ldots N$. Тогда последовательность значений $x(0), x(1), \ldots x(N)$ 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 $U_1(\tau), U_2(\tau),\ldots, U_r(\tau)$, 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

$$x(\tau) = x(x_0, U(\tau)), \qquad (2.19)$$

где $x_0 = x(\tau = 0)$ – начальное состояние объекта; $U(\tau) \in U_\tau (x(\tau - 1)$; $\tau = 1, 2, \ldots, N$.

Из соотношений (2.18) и (2.19) следует, что, выбирая различные начальные состояния объекта (x_0) 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

$$I_N(x_0, U(\tau)) = \sum_{\tau=1}^{N} \phi_\tau(x(\tau-1), U(\tau)). \qquad (2.20)$$

Задачей оптимального управления является выбор такого закона $U(\tau)$ из области допустимых значений $U(\tau) \in U_\tau(x(\tau-1)$, при котором в процессе движения объекта из начального состояния x_0 в конечное x_N функционал качества будет максимальным:

$$I_N(x_0, U(\tau)) = \max I_N(x_0, U(\tau)). \qquad (2.21)$$

Таким образом, из соотношений (2.20), (2.21) 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 схемой оптимального управления движением объекта и технологией изготовления, например, металлической детали и даже последующей ее эксплуатацией, исключающей появление различного рода отказов (рис. 2.2).

После кристаллизации слиток подвергается пластической деформации при горячей, а затем холодной прокатке, далее – смягчающей термообработке, механической обработке, штамповке и т. д. по схеме рис. 2.2. 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 $к = 1, 2, ... k$. Так, если считать состав сплава заданным, то в процессе литья можно управлять температурой $U_1(1)$ – $t_л$, скоростью охлаждения, как в период кристаллизации $U_2(1)$ – $V_{кр}$, так и после ее завершения $U_3(1)$ – $V_{охл}$.

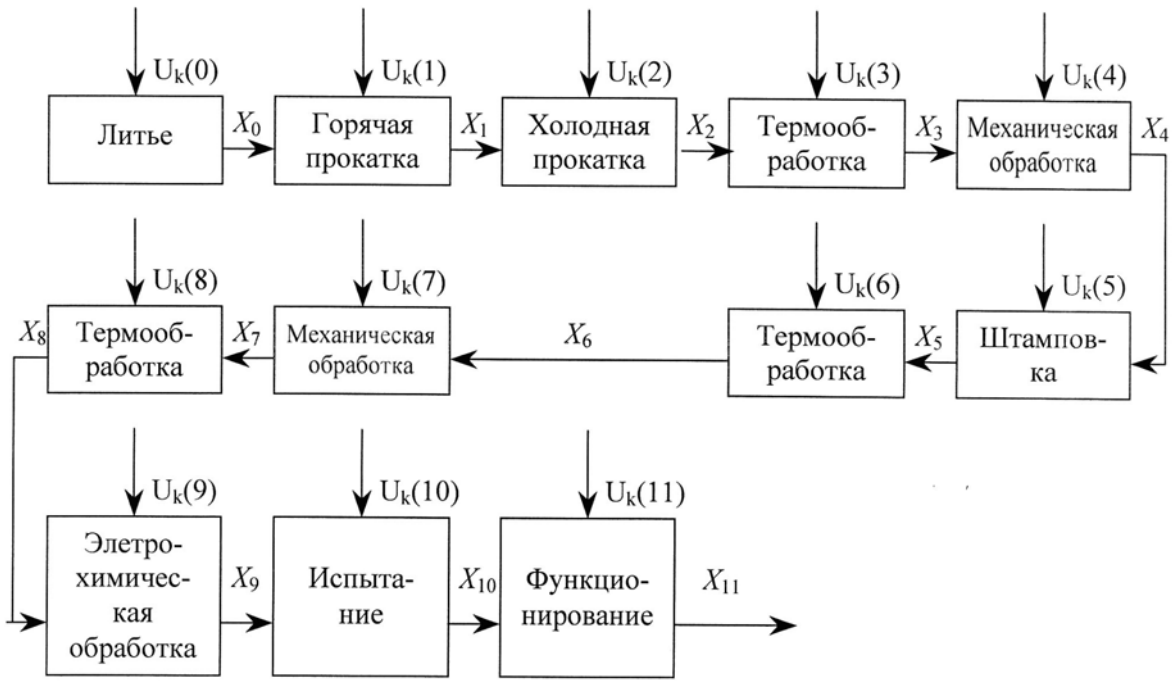


Рис. 2.2. Технологическая схема изменения состояния заготовки в процессе обработки и детали при испытании и функционировании

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 $U_5(2) – \dot{\varepsilon}_i$ 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 $U_4(4) – V_4$. Параметры процесса штамповки – количество переходов $U_1(6) \to n_{шт}$, степень деформации в характерных сечениях заготовки по переходам $U_2(6) \to \varepsilon_i$, геометрия рабочего инструмента по переходам $U_3(6) \to h_i$, число матриц $U_4(6) \to N_М$, вид смазки $U_5(6) \to C_{шт}$.

При окончательной термообработке можно указать температуру нагрева под отжиг $U_1(10) – t_3$ длительность отжига $U_2(10) – m_3$, наличие промежуточных отпусков $U_3(10) – P_о$, температуру окончательного отпуска $U_4(10) – t_{от}$. При испытании такими параметрами могут быть температура $U_1(12) – t_ф$, темп стрельбы $U_2(12) \to \tau_ц$, величина внутреннего давления $U_4(12) – p$ и другие параметры.

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

В качестве фазовых координат системы объекта A согласно (2.18) могут быть приняты КТП изделия (см. табл. 2.3). Очевидно, что отмеченные фазовые координаты будут функциями не только управлений $U_s(\tau)$ на каждом τ-м переходе, но и начальных состояний системы $x(\tau – 1)$.

Математически сказанное формулируется в виде уравнений движения фазовых координат (2.19), в которых $f\tau(x(\tau – 1), U(\tau))$ представляет результат обработки на τ–y-переходе. Конечно, получение точного явного вида функций или операторов

$f\tau(x(\tau-1), U(\tau))$ для большинства комплексных технологических процессов, основанных на реализации разнородных физических явлений, является 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 оптимизировать расходы на указанных операциях и обеспечить на выходе заданное сочетание КТП, обеспечивающих качество объекта и надежность его функционирования. Математически сказанное записывается в виде

$$I_N(x_0) = \min \sum_{\tau=1}^{N} \phi_\tau(x(\tau-1), U(\tau)), \qquad (2.22)$$

$$x(N)^{U_\tau} \geq [a], \qquad (2.23)$$

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

Если ограничения (2.22) на создаваемую конструкцию по КТП нежесткие, то в отдельных случаях можно отступить 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:

$$I_N(x_0) = \max\left\{\Psi_N(x(\tau-1), U(\tau)) - \sum_{\tau=1}^{N-1} \phi_\tau(x(\tau-1), U(\tau))\right\}, \qquad (2.24)$$

где $\Psi_N(x(N-1), U(N))$ – прибыль, получаемая в результате обработки деталей на N-й операции при значениях параметров обработки $U(\tau)$, если в результате предшествующих операций получены

свойства $x(N–l)$; $\varphi\tau(x(\tau–l), U(\tau))$ – расходы на $\tau–y$-переходах. Максимизация функционала дохода (или качества) может осуществляться нередко путем введения новых технологических операций, которые ранее отсутствовали, 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. 2.3).

Как следует из приведенного функционального алгоритма технологического обеспечения качества и надежности создаваемого изделия, на первом этапе (блоки 1...6) устанавливается состав определяющих свойств элемента патрона (патрона в целом). 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, расчетно-аналитическим методом оцениваются функциональные свойства детали как элемента технической системы "патрон".

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), с 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

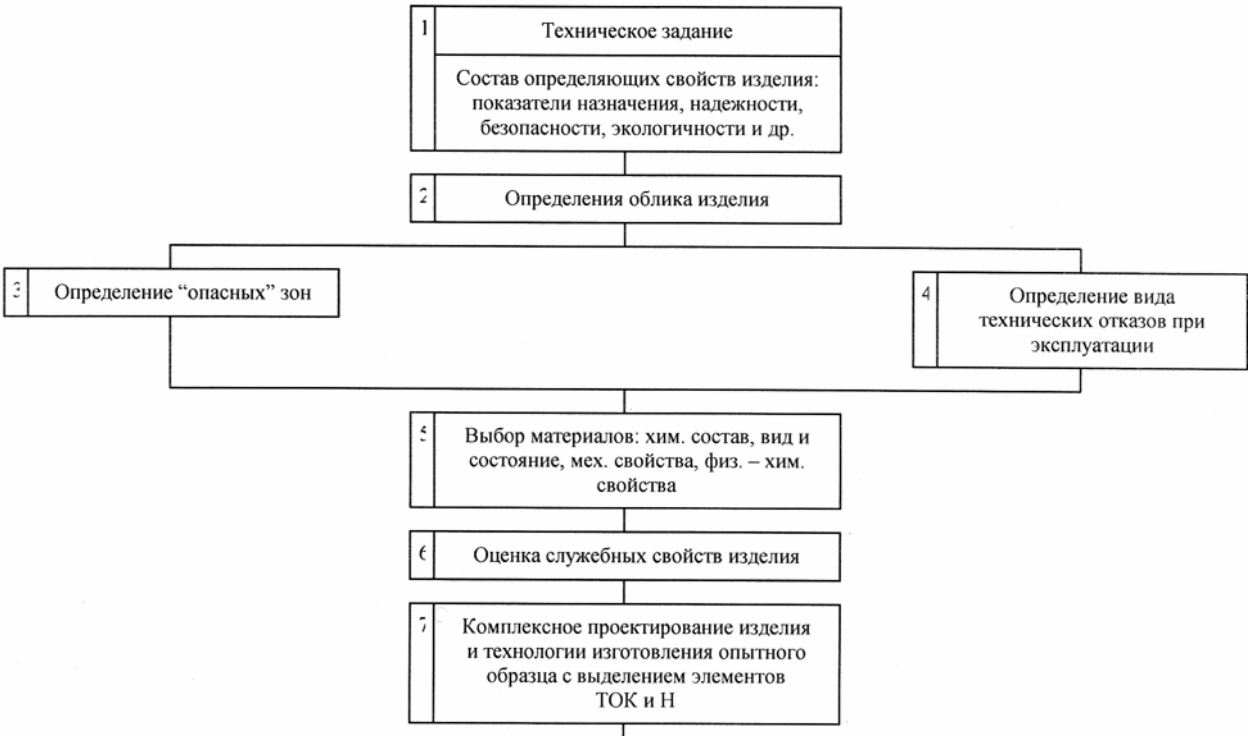

1
Техническое задание
Состав определяющих свойств изделия: показатели назначения, надежности, безопасности, экологичности и др.
2
Определения облика изделия
3
Определение “опасных” зон
4
Определение вида технических отказов при эксплуатации
5
Выбор материалов: хим. состав, вид и состояние, мех. свойства, физ. – хим. свойства
6
Оценка служебных свойств изделия
7
Комплексное проектирование изделия и технологии изготовления опытного образца с выделением элементов ТОК и Н

Рис. 2.3. Обобщенный алгоритм технологического обеспечения качества и надежности металлического элемента патрона

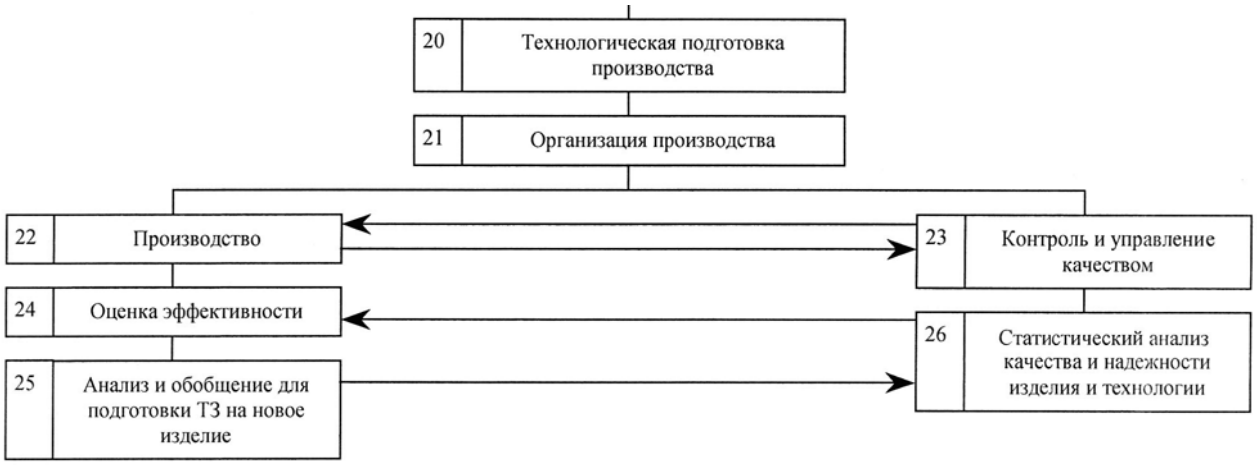


Рис. 2.3 (окончание)

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) производств патронов соответствующих типоразмеров.

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

Контрольные вопросы

1. Что понимают под качеством изделия и какие группы показателей применяют для его оценки?
2. Какие показатели качества характеризуют эксплуатационные свойства патронов?
3. Какие показатели качества характеризуют технологические свойства патронов и его металлических элементов?
4. Какие методы применяют для оценки уровня показателей качества патронов?
5. Что понимается под отказом изделия и какие критерии применяют для характеристики отказов?
6. Какие технологические факторы влияют на эксплуатационные свойства патронов?
7. По каким признакам классифицируются отказы металлических элементов патронов?
8. Каков типовой алгоритм обеспечения качества проектируемого и предназначенного для производства изделия?

Библиографический список

1. *Данилин Г.А.*, Огородников В.П., Заволокин А.Б. Основы проектирования патронов стрелкового оружия: Учебник. СПб.: БГТУ, 2005. – 374 с.

2. *Агеев Н.П.*, Богатырев А.В., Афанасьев А.С. Технологические основы конверсии военного производства: Учебное пособие / Под ред. Н.П. Агеева. СПб., БГТУ, 1996. 248 с.

3. *Дружинин Г.В*. Методы оценки и прогнозирования качества. М.: Радио и связь, 1982. 160 с.

3. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАТРОНОВ

3.1. Постулируемые положения

При рассмотрении обобщенной модели комплексного технологического процесса (см. разд. 2) установлены основные группы свойств процесса как объекта проектирования и функционирования. Важнейшими из них являются физико-механические (физические) $\{Z^k_{\text{ф}}\}$ свойства, так как они определяют физическую природу технологических процессов, позволяют оценивать и регулировать их технологические возможности по формированию свойств объектов технологии с оптимальными затратами ресурсов.

При анализе возможностей технологического обеспечения качества и надежности патронов и построении математических моделей комплексных технологических процессов изготовления их элементов по определяющим физико-механическим параметрам принимаем во внимание следующие постулируемые в теории технологии металлов положения.

1. Комплексный, по структуре – линейно-циклический, технологический процесс изготовления детали есть закономерная, управляемая, последовательная смена разнородных физических явлений и соответствующих им форм технологического движения, реализуемых в процессе взаимодействия обрабатываемой заготовки и окружающей технологической среды, приводящая, согласно закону сохранения энергии, к изменению физико-механического состояния и свойств объекта технологии. Взаимодействие обрабатываемой заготовки и технологической среды в пределах завершенных технологических циклов изготовления металлических элементов рассматривается как результат реализации двух основных форм движения: деформационной и термической. В самом деформируемом теле возможно взаимодействие еще и других форм движения: диффузионной, фазовой, химической. Однако при пластической деформации металлов непосредственно

оценить изменение этих форм из опытов или теоретически практически невозможно, поэтому их сводят также к термической форме движения и энергии.

На этом основании и в соответствии с законом сохранения энергии уравнение (2.6) представим в следующем виде:

$$dU = \sum_{i=1}^{j=2} dQ_i = dA_{\text{уд}} - dQ_{\text{т}}\ , \qquad (3.1)$$

где $\sum_{i=1}^{j=2} dQ_i$ – обобщенная удельная работа, равная алгебраической сумме элементарных работ различного рода, подчиняющаяся законам аддитивности и коммутативности; $dA_{\text{уд}}$ – удельная работа формоизменения при пластической деформации; $dQ_{\text{т}}$ – термическая энергия; j – количество видов технологического движения, принимаемого во внимание.

Из третьего закона пластичности (при конечной монотонной деформации интенсивность напряженного состояния зависит от удельной механической работы, затрачиваемой на изменение формы), сформулированного Г.А. Смирновым-Аляевым и В.М. Розенберг, следует:

$$dA_{\text{уд}} = \Phi(\varepsilon_i) d\varepsilon_i\ , \qquad (3.2)$$

где $\Phi(\varepsilon_i) = \sigma_i(\varepsilon_i)$.

Составляющая термической энергии $dQ_{\text{т}}$ в уравнении (3.1) определяется также по известному соотношению

$$dQ_{\text{т}} = T(dS_{\text{т}} - dS_{\text{д}}), \qquad (3.3)$$

где $dS_{\text{т}}$, $dS_{\text{д}}$ – изменение плотности энтропии, обусловленное теплообменом с окружающей технологической средой и диссипацией деформационной энергии.

Следовательно, результирующий эффект сложного воздействия на предмет обработки в комплексном технологическом процессе представляет собой сумму эффектов, вызываемых каждым воздействием в отдельности (принцип суперпозиции).

2. Накопление количественных изменений обобщенной работы приводит к определенным качественным изменениям состояния обрабатываемого металла заготовки, вызывающим его переход через предельные (необратимые) для определенных условий состояния.

Энергетическое условие перехода через любое k-состояние представим в следующем виде:

$$Q_{i\Sigma} \geq Q_k \quad (k = 1, 2, ..., 4), \tag{3.4}$$

где $Q_{i\Sigma} = \sum_{j=1}^{N_{зц}} \left(A_{уд} - Q_т\right) j$; $N_{зц}$ – количество завершенных циклов, реализуемых в технологическом процессе данного вида.

На примере анализа диаграмм σ_i–ε_i как обобщенной феноменологической модели процесса пластической деформации авторами выявлены четыре основные стадии процесса и, соответственно, четыре (k = 4) предельных состояния металла, отвечающих переходу из области:

1 – малых упруго-пластических деформаций в область устойчивой пластической деформации;

2 – устойчивой пластической деформации в область неустойчивой пластической деформаций;

3 – неустойчивой пластической деформации в область предразрушения;

4 – от предразрушения к конечному макроразрушению.

Любое изменение физико-механического состояния обрабатываемого объекта технологии (заготовки) определяется изменением структуры металла, а поэтому физико-механические свойства процесса и объекта технологии зависят от формируемой структуры:

$$\Delta C_м = \Psi(S_м), \tag{3.5}$$

где $\Delta C_м$ – изменение физико-механических характеристик металла в процессе обработки; $S_м$ – символ структуры металла любого масштаба (электронной, атомной, зеренной); Ψ – оператор изменения структуры.

Деградация структуры металла в процессе обработки сопровождается при пластической деформации непрерывным образованием и ростом микронесплошностей (поврежденности) в виде микротрещин и микропор и при их критическом объеме – разрушением материала.

В качестве меры поврежденности структуры металла вводится скалярная величина – коэффициент использования ресурса пластичности ω_i.

Тепловое воздействие при промежуточной термообработке может существенно влиять на критические значения параметров и

переход металла из одного состояния в другое за счет протекания релаксационных, разупрочняющих процессов.

3. Основными физико-механическими характеристиками технологических процессов изготовления деталей являются удельная обобщенная работа Q_i, интенсивность ε_i и степень e_i деформации, интенсивность напряженного состояния σ_i, коэффициенты использования ресурса пластичности ω_i, относительный модуль упрочнения $E_{\sigma i}$, а также характеристики предельных состояний металла (σ_{io}, ε_{io}, σ_{iy}, e_{iy}, σ_{ip}, e_{ip}) и механических свойств ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_в$, $S_к$, ε_{iy}, ε_{ip}, Ψ, δ) элементов патрона (гильз, оболочек, сердечников и др.).

4. Каждая из характеристик технологического процесса и изготавливаемого изделия на любой стадии определяется как сумма систематической $C_{тjд}$ и случайной $C_{тjs}$ составляющих:

$$C_{тj}(x, y, z) = C_{тjд}(x, y, z) + C_{тjs}(x, y, z). \qquad (3.6)$$

Функция $C_{тjд}(x, y, z)$ есть детерминированная функция, описывающая систематическую составляющую, а функция $C_{тjs}(x, y, z)$ – случайная функция, описывающая случайные возмущения, накладывающиеся на управляемый в среднем процесс и вызываемые случайными вариациями некоторых параметров процессов обработки.

5. В пределах технологического и «жизненного» циклов изделия проявляется технологическая наследственность, выражающаяся в способности объекта технологии сохранять свои свойства при переходе от предыдущей к последующей стадии обработки и функционирования, восстанавливать их частично или полностью в процессе внешнего воздействия (технологического или функционального) и в период последействия (разгрузки от любого технологического воздействия).

3.2. Оценка накопленной эффективной степени деформации

Важнейшим показателем рассматриваемых технологических процессов изготовления металлических элементов патронов является степень деформации. В общем случае конечную деформацию материальной частицы деформируемого физического тела можно количественно определять двумя численно различными характеристиками: степенью деформации e_i и интенсивностью деформации ε_i.

Из теории пластичности известно, что интенсивность больших (конечных) деформаций (второй инвариант деформации) является вполне определенной скалярной (т.е. количественной) характеристикой степени изменения формы деформируемой материальной частицы и выражается в зависимости от компонентов деформации как

$$\varepsilon_i = 2/3\sqrt{1/2(\varepsilon_{xx}-\varepsilon_{yy})^2 + 1/2(\varepsilon_{yy}-\varepsilon_{zz})^2 + 1/2(\varepsilon_{zz}-\varepsilon_{xx})^2 + 3/4(\gamma_{xy}^2+\gamma_{yz}^2+\gamma_{zx}^2)} \tag{3.7}$$

или

$$\varepsilon_i = 2/3\sqrt{1/2(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2 + 1/2(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2 + 1/2(\varepsilon_3-\varepsilon_1)^2}. \tag{3.8}$$

Согласно предложению А.А. Ильюшина, степенью деформации называют такую переменную величину, полная производная которой по времени равна интенсивности скорости деформации, т.е.

$$e_i = \int_0^\tau \dot{\varepsilon}_i dt \tag{3.9 а}$$

и

$$de_i / d\tau = \dot{\varepsilon}_i\ . \tag{3.9 б}$$

Это условие, а также условие равенства нулю в начальный момент процесса формоизменения значений степени деформации во всех точках деформируемого тела и устанавливают основное понятие степени деформации.

Равенства (3.9) справедливы как для монотонных, так и немонотонных процессов. В работах Г.А. Смирнова-Аляева сформулированы два характерных условия монотонности:

1) условие совпадения главных осей скорости деформации с одними и теми же материальными волокнами (направлениями) материальной частицы;

2) условие неизменности за весь процесс вида малой деформации (v_ε = const).

Практический смысл приведенного выше определения заключается в том, что степенью деформации любой материальной частицы следует называть арифметическую сумму интенсивностей последовательных малых пластических деформаций ε_{ii}, в пределах каждой из которых в отдельности процесс деформации монотонен:

$$e_i = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_{ii}\ , \tag{3.10}$$

где n – количество выделяемых стадий процесса.

При изучении деформации неоднородно деформируемого тела, как правило, изучают однородную деформацию отдельных его частей (элементарных объемов); например, в пределах толщины стенки штампуемой листовой заготовки в определенном ее сечении материал заготовки считается изотропным. При этом полагают, что удовлетворяются следующие условия: все прямые линии и плоскости, отмеченные в рассматриваемой части тела до деформации, остаются прямыми линиями и плоскостями после деформации; все параллельные прямые и плоскости остаются параллельными и после деформации, а длины прямолинейных отрезков изменяются в одинаковом соотношении.

Расчет интенсивности (ε_i) и степени (e_i) деформации выполняется по соотношениям, устанавливаемым из анализа деформированного состояния для определенных процессов пластической деформации.

Введем применительно к многооперационному, многоцикловому процессу изготовления деталей понятие единичной и накопленной степени деформации. Единичная степень деформации при условии монотонности процесса будет равна интенсивности деформации на отдельном переходе операции, определяемой по соотношению размеров заготовки после пластической деформации и исходных размеров. Так, например, при вытяжке без утонения за один переход и одностороннем зазоре между пуансоном и матрицей, превышающем утолщенную кромку заготовки ($z > s$), процесс деформации в зоне кромки является монотонным, а вид деформированного состояния – соответствующим простому сжатию. Для этого случая единичная степень деформации будет равна:

$$e_i = \varepsilon_i = \ln(r / R_0) = \ln {}^{1}\!/_{m}, \qquad (3.11)$$

где R_0, r – размеры заготовки в зоне кромки до и после вытяжки; m – коэффициент вытяжки.

В том случае, если зазор будет меньше утолщенной кромки, процесс не может считаться монотонным и, по крайней мере, включает как минимум две характерные стадии с различным видом деформированного состояния v_ε: на первой стадии кромка утолщается ($v_\varepsilon = 1$), на второй – утоняется без изменения поперечных размеров($v_\varepsilon = 0$). Согласно соотношению (3.10), накопленная за две стадии степень деформации будет равна:

$$e_{i\Sigma} = \left(\varepsilon_{i1} + \varepsilon_{i2}\right) = \left(1 - 1/\sqrt{3}\right)\ln\left(d_{i-1}/d_i\right) + 2/\sqrt{3}\ln\left(F_{i-1}/F_i\right), \tag{3.12}$$

где $d_{i\text{-}1}$, d_i – внутренние диаметры; $F_{i\text{-}1}$, F_i – площади поперечного сечения (по кромке) заготовки до и после вытяжки.

Будем различать накопленную степень деформации, характеризующую 1) изменение формы деформируемого тела и 2) деформационное упрочнение металла заготовки.

Накопленная степень деформации, характеризующая изменение формы, равна сумме единичных степеней деформации, реализуемых на каждой из штамповочных операций, и не зависит от промежуточной и конечной термообработки заготовки:

$$e_{l\Sigma}^{i} = \sum_{m=1}^{N_{\text{оп}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{п}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{ст}}} i_{klm}^{j}, \tag{3.13}$$

где k, i, m – количество стадий, переходов, операций. В пределах отдельной стадии процесс принимается приближенно монотонным. Накопленную степень деформации, характеризующую деформационное упрочнение металла, назовем эффективной степенью деформации. Для обозначения этого понятия применяют термины «параметр упрочнения» и «параметр Удквиста». Можно именовать эту величину также степенью наклепа.

В пределах отдельного технологического штамповочного перехода эффективная степень деформации будет равна соответствующей единичной деформации; в пределах отдельного этапа технологического процесса, состоящего из нескольких незавершенных технологических циклов (без термической обработки), эффективная накопленная степень деформации определяется по соотношению (3.13). Однако при реализации в процессе завершенных технологических циклов оценка эффективной степени деформации становится затруднительной из-за влияния процессов промежуточной термообработки. Для определения эффективной степени деформации после выполнения завершенного цикла запишем правую часть равенства (3.1) с учетом (3.2) и (3.3) в следующем виде:

$$\sigma_i^j\left(e_i^j\right)de_i^j - T^j dS_{\Sigma}^j = \sigma_{i\text{эф}}^j\left(e_{i\text{эф}}^j\right)de_{i\text{эф}}^j, \tag{3.14}$$

где $dS_{\Sigma}^j = (dS_{\text{т}}^j - dS_{\text{д}}^j)$. Из этого равенства получим

$$\sigma_i^j\left(e_i^j\right)de_i^j\,(1 - K_{\text{т}}^j) = \sigma_{i\text{эф}}^j\left(e_{i\text{эф}}^j\right)de_{i\text{эф}}^j,$$

откуда

$$de^j_{1\text{эф}} = \frac{\sigma^j_i(e^j_i)de^j_i}{\sigma^j_{i\text{эф}}(e^j_{i\text{эф}})}\left(1 - K^j_{\text{т}}\right). \qquad (3.15)$$

Представим зависимости $\sigma^j_{i\text{эф}}\left(e^j_{i\text{эф}}\right)$ и $\sigma^j_i(e^j_i)$ в виде степенных функций

$$\sigma^j_i(e^j_i) = A(e^j_i)^n \text{ и } \sigma^j_{1\text{эф}}\left(e^j_{i\text{эф}}\right) = A(e^j_{i\text{эф}})^n, \qquad (3.16)$$

где A и n – постоянные коэффициенты для определенной марки материала. В уравнении (3.15) коэффициент эффективности термообработки будет равен:

$$K^j_{\text{т}} = \frac{T^j dS^j_{\Sigma}}{\sigma^j_i(e^j_i)de^j_i}. \qquad (3.17)$$

Принимаем допущение, что коэффициент $K_{\text{т}}{}^i$ – величина постоянная, не зависящая от e_i. После подстановки $\sigma^j_i\left(e^j_i\right)$ и $\sigma^j_{i\text{эф}}\left(e^j_{i\text{эф}}\right)$ из (3.16) в (3.15) и интегрирования получили

$$e^j_{i\text{эф}} = e^j_i\left(1 - K^j_{\text{т}}\right)^{\frac{1}{1+n}}. \qquad (3.18)$$

Для упрощения может быть принята не степенная, а линейная функция $e^j_{i\text{эф}} = e^j_i\left(1 - K^j_{\text{т}}\right)$. При применении полной разупрочняющей термической обработки, например полного рекристаллизационного отжига, коэффициент $K_{\text{т}}$ = 1 и из (3.18) следует, что $\left(e^j_{i\text{эф}}\right) = 0$, т.е. предшествующее деформационное упрочнение металла полностью снимается. Если после холодной пластической деформации термообработка отсутствует, то $K^j_{\text{т}} = 0$ и $e^j_{i\text{эф}} = e^j_i$.

При неполной разупрочняющей термообработке $K^j_{\text{т}}$ занимает промежуточное значение: $0 < K^j_{\text{т}} < 1$; $0 < e_{i\text{эф}}{}^j < e^j_i$. После выполнения двух завершенных технологических циклов величина накопленной эффективной деформации будет равна:

$$(e^j_{i\text{эф}})_2 = [e^j_{i1}\left(1 - K^j_{\text{т}1}\right)^{\frac{1}{1+n}} + e^j_{i2}]\left(1 - K^j_{\text{т}2}\right)^{\frac{1}{1+n}}, \qquad (3.19)$$

где e^j_{i1}, e^j_{i2} – степени деформации после первого и второго циклов; $K_{\text{т}1}{}^{\text{j}}$, $K_{\text{т}2}{}^{\text{j}}$ – коэффициенты эффективности термообработки на первом и втором технологических циклах.

Аналогично определяем степень эффективной деформации после трех завершенных технологических циклов обработки:

$$(e^j_{i\text{эф}})_3 = \{[e^j_{i1}\left(1-K^j_{\text{т}1}\right)^{\frac{1}{1+n}} + e^j_{i2}]\left(1-K^j_{\text{т}2}\right)^{\frac{1}{1+n}} + e^j_{i3}\}\left(1-K^j_{\text{т}3}\right)^{\frac{1}{1+n}}, \quad (3.20)$$

где $e^j_{i\,\text{э}}$, $K^j_{\text{тэ}}$– степень эффективной деформации и коэффициент эффективности термообработки после завершения третьего цикла.

Тогда на основании (3.18)...(3.20) можно записать для любого числа технологических циклов ($N = N_{\text{з.ц}} + N_{\text{н.ц}}$) при условии $0 \le K_{\text{т}i}^j \le 1$:

$$\left(e^j_{\text{эф}}\right)_i = \sum_{i=1}^{N} e^j_{ii} \prod_{i=1}^{N} (1-K^j_{\text{т}i})^{\frac{1}{1+n}}. \quad (3.21)$$

После выполнения очередной штамповочной операции накопленная эффективная степень деформации будет равна:

$$\left(e^j_{\text{эф}}\right)_i = \sum_{i=1}^{N} e^j_{i(i-1)} \prod_{i=1}^{N-1} (1-K^j_{\text{т}(i-1)})^{\frac{1}{1+n}} + e^j_{ii}. \quad (3.22)$$

В уравнения (3.18)...(3.22) входят $K_{\text{т}i}^j$ (i = 1, 2, ... N), значения которых могут быть определены только экспериментально, например, с использованием эмпирических математических моделей характеристик механических свойств ($\sigma_{0,2}$, $\sigma_{\text{в}}$, HV) в виде уравнений регрессии, построенных с применением метода активного, планируемого эксперимента. Подставим в (3.18) вместо $e^j_{i\,\text{эф}}$ и e^j_i их значения из (3.16) и после несложных преобразований получим

$$K_{\text{т}} = 1 - \left[\frac{\sigma_{i\text{эф}}(e_{i\text{эф}})}{\sigma_i(e_i)}\right]^{\frac{1+n}{n}}. \quad (3.23)$$

В этом уравнении функции $\sigma_{i\text{эф}}$ ($e_{i\text{эф}}$) и σ_i (e_i) представим в виде выходных переменных (откликов) многофакторной модели завершенного цикла ($\sigma_{i\text{эф}}$ ($e_{i\text{эф}}$) и, соответственно, однофакторной модели незавершенного цикла $\sigma_{i\text{эф}}$ ($e_{i\text{эф}}$). Варьируя параметры e_{i0}, t, τ и n, можно получить в виде номограмм или аналитических аппроксимаций зависимость

$$K^j_{\text{т}} = K^j_{\text{т}}(e_{i0}, e_i, t, \tau, n). \quad (3.24)$$

Из равенства (3.23) следует, что при применении полной разупрочняющей термообработки $\frac{\sigma_{i\text{эф}}(e_{i\text{эф}})}{\sigma_i(e_i)} < 1$, а показатель степени

$(1 + n)/n >> 1$ (n = 0,20...0,50) для различных металлов и сплавов и, как следствие, $K_т \approx 1$, что согласуется с формулой (3.18).

При отсутствии термообработки $e_i = e_{i\text{эф}}, \dfrac{\sigma_{i\text{эф}}(e_{i\text{эф}})}{\sigma_i(e_i)} = 1$ и $K_т = 0$.

3.3. Модель кривой течения (упрочнения) $\sigma_i - \varepsilon_i$ материала

Для оценки предельных деформаций и энергосиловых параметров в технологических расчетах важное значение имеет знание закономерностей упрочнения материала и изменения его сопротивления деформированию для различных процессов изготовления металлических деталей (одно- и многооперационных, сопровождаемых термической обработкой и без нее).

В настоящее время широко используется в научно-технической литературе и практике технологического проектирования положение, обоснованное в трудах Г.А. Смирнова-Аляева и его последователей, о существовании при монотонном (приближенно-монотонном) однопереходном формоизменении металлов однозначной функциональной связи между интенсивностью напряженного состояния σ_i и интенсивностью результативной деформации ε_i и соответственно степенью деформации: $\sigma_i = \Phi(e_i) = \Phi(\varepsilon_i)$, именуемой «кривой течения» или «кривой упрочнения».

Эта зависимость чаще всего определяется по результатам механических испытаний на растяжение, сжатие, кручение и некоторых других методов. Зависимости «$\sigma_i - \varepsilon_i$» ($\sigma_i - e_i$), установленные экспериментально, затем аппроксимируются теми или иными аналитическими функциями. При анализе процессов холодной листовой штамповки наиболее часто применяют степенные и линейные зависимости, например, следующего вида:

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^n \text{ – при } 0{,}002 \le \varepsilon_i \le 2\varepsilon_{iy}; \tag{3.26}$$

$$\sigma_i = \sigma_{iy} 2^n (1 + 0{,}5\varepsilon_i - \varepsilon_{iy}) \text{ – при } 2\varepsilon_{iy} \le \varepsilon_i \le \varepsilon_{ip}; \tag{3.27}$$

$$\sigma_i = \sigma_{0,2} + b\varepsilon_i^n, \tag{3.28}$$

где $A = \dfrac{\sigma_{iy}}{\varepsilon_{iy}^n}$, $n = \varepsilon_{iy}$, b – коэффициенты.

Уравнение (3.26) удовлетворяет обязательным известным условиям аппроксимации диаграммы «$\sigma_i - \varepsilon_i$»:

$$\text{при } \varepsilon_i = \varepsilon_{iy} \qquad \sigma_i = \sigma_{iy}; \ \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} = \sigma_{iy}. \tag{3.29}$$

Зависимость (3.27) является линейной, в отличие от степенной (3.26). Известна также линейная аппроксимация упрощенного вида:

$$\sigma_i = \sigma_{i0} + E_к \varepsilon_i, \qquad (3.30)$$

где σ_{i0} – экстраполированный предел текучести; $E_к$ – касательный модуль (модуль пластичности).

Значения σ_{io} и $E_к$ определяются из формул

$$\sigma_{i0} = \sigma_{iy}(1 - \varepsilon_{iy}); \quad E_к = {d\sigma_i}/{d\varepsilon_i} = \sigma_{iy}. \qquad (3.31)$$

Одной из аппроксимаций диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ ($\sigma_i - e_i$) является ее представление в виде многочлена, предложенное Г.А. Смирновым-Аляевым и В.М. Розенберг:

$$\sigma_i = \sigma_{iпр} - c_1 e^{-\varepsilon_i} - c_2 e^{-N\varepsilon_i}. \qquad (3.32)$$

Постоянные $\sigma_{iпр}$, c_1, c_2 определяются расчетом по результатам испытания на растяжение образцов.

Зависимости (3.26)...(3.32) позволяют оценить интенсивность напряженного состояния в однопереходных, приближенно монотонных процессах, не сопровождаемых термической обработкой.

В однопереходных немонотонных и многопереходных знакопеременных процессах без термической обработки (незавершенных технологических циклов) интенсивность напряженного состояния σ_i должна определяться с учетом накопленной за несколько стадий процесса, в пределах одного перехода или нескольких переходов, степени деформации (3.10) и возможного проявления эффекта Баушингера. В этих процессах после очередного перехода разгрузка часто сопровождается последующим нагружением этого же участка заготовки напряжениями обратного знака, т.е., по существу, реализуется цикл нагружения: нагрузка (растяжение) – разгрузка – нагрузка (сжатие) – разгрузка и т. д. При этом ход кривых упрочнения может быть существенно изменен в связи с проявлением эффекта Баушингера. Этот эффект состоит в снижении сопротивления началу пластической деформации при изменении знака нагружения (например, сжатие после растяжения и разгрузки). Так, если растянуть образец до некоторой степени деформации e_i (первый переход), то величина интенсивности напряженного состояния, согласно диаграмме $\sigma_i - e_i$ (рис. 3.1), будет равна σ_{i1}. Степень деформации сдвига $\lambda_i = \sqrt{3} e_i$. После разгрузки (усилие деформирования падает до нуля) и по-

следующей осадки (второй переход) металл перейдет в пластическое состояние при значительно меньшей интенсивности напряженного состояния $\sigma_{i2} = \sigma_{0,2}$. Коэффициент, равный отношению условного предела текучести при обратном нагружении к максимальному значению интенсивности напряженного состояния при прямом нагружении, составляет $\beta = \sigma_{i2}/\sigma_{i1}$ и, как известно, называется коэффициентом Баушингера.

На рис. 3.2 приведены диаграммы $\sigma_i - \lambda_i$ малоуглеродистой стали, построенные по результатам испытаний на растяжение образцов, вырезанных из труб после многопроходной прокатки. На графиках начальные точки кривых упрочнения смещены относительно начала координат по оси λ (степень деформации сдвига) на величину предварительной деформации. Из рисунка видно, что кривые упрочнения, полученные после различной предварительной деформации, не совпадают с кривой упрочнения исходного металла, а проходят ниже. Соответственно условный предел текучести наклепанного металла оказывается значительно меньше максимального сопротивления деформированию исходного металла, которое бы он имел при λ, равном степени предварительной деформации.

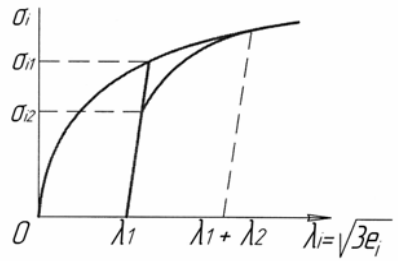


Рис. 3.1. Схема к определению коэффициента Баушингера

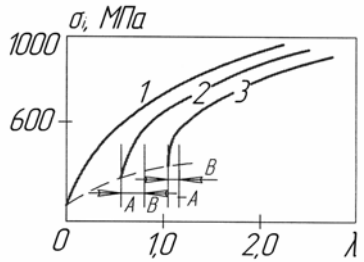


Рис. 3.2. Диаграмма $\sigma_i - \lambda_i\,(e_i)$

Анализ результатов многих исследований, в том числе при больших пластических деформациях, позволяет сделать следующие выводы.

1. Эффект Баушингера проявляется при деформировании любого реального металла или сплава при любой степени знакопеременной деформации.

2. Общей закономерностью пластического поведения металлов и сплавов при смене знака деформации является уменьшение предела текучести по сравнению с достигнутой интенсивностью на-

пряжений при прямом деформировании, а также увеличение интенсивности упрочнения $d\sigma_i \times d\varepsilon_i$ на начальном участке диаграммы $\sigma_i - e_i$ (участок «А», рис. 3.2) при сохранении той же величины или некотором уменьшении на следующем основном участке диаграммы $\sigma_i - e_i$ (участок «В»).

3. Значение коэффициента β, в основном, зависит от химического состава и структурного состояния исследуемого материала и практически не зависит от степени предварительной деформации, степени накопленной деформации, числа перемен направлений нагружения, асимметрии цикла, схемы напряженного состояния.

4. Эффект Баушингера при развитых предварительных пластических деформациях имеет, в основном, дислокационную природу.

В работах металлофизиков излагается гипотеза, согласно которой при смене знака деформации достигнутая при прямом нагружении плотность неподвижных дислокаций скачкообразно уменьшается на некоторую величину. Скачкообразное же уменьшение плотности неподвижных дислокаций обусловливает соответствующее уменьшение предела текучести.

Для расчета кривой упрочнения при повторном нагружении обратного знака А. Богатов и др. рекомендуют следующее соотношение:

$$\sigma_{ii} = \alpha_1 \left(\sigma_{0,2}\right)_{(i-1)} + \alpha b \lambda_i^n = \alpha_1 (\sigma_{0,2})_{(i-1)} + \alpha b \left(\sqrt{3} e_i\right)^n, \qquad (3.33)$$

где $\alpha_1 = \dfrac{\beta\left(1 + b\left(\sqrt{e_{i-1}}\right)^n\right)}{(\sigma_{0,2})_{i-1}}$; $\alpha = \alpha_1^{1-n}$ – для начального участка диаграммы $\sigma_{ii} - e_{ii}$; $\alpha = 1$ – для основного участка диаграммы $\sigma_{ii} - e_{ii}$. При e_{ii}=0

$$\sigma_{ii} = \beta\left[(\sigma_{0,2})_{i-1} + b\left(\sqrt{3} e_{i-1}\right)^n\right]. \qquad (3.34)$$

Коэффициент α_1 в уравнении (3.33) зависит от свойств деформируемого металла, характеризуемого параметрами $(\sigma_{0,2})_{i-1}$, b, n, β, и степени предварительной деформации e_{i-1} и определяет положение исходной точки кривой обратного нагружения. Коэффициент λ характеризует соотношение интенсивностей прямого и обратного нагружений.

Анализ с помощью (3.33) показывает, что диаграмма $\sigma_{ii} - e_{ii}$ при знакопеременном деформировании представляет собой пилообразную ломаную линию (рис. 3.3), расположенную между кривой упрочнения, соответствующей квазимонотонному деформированию (*1*), и некоторой расчетной кривой, характеризующей условные пределы текучести при обратных нагружениях (*3*). Уравнение последней кривой определено формулой (3.34). Каждый из восходящих участков ломаной кривой *2* рассчитывается по (3.33).

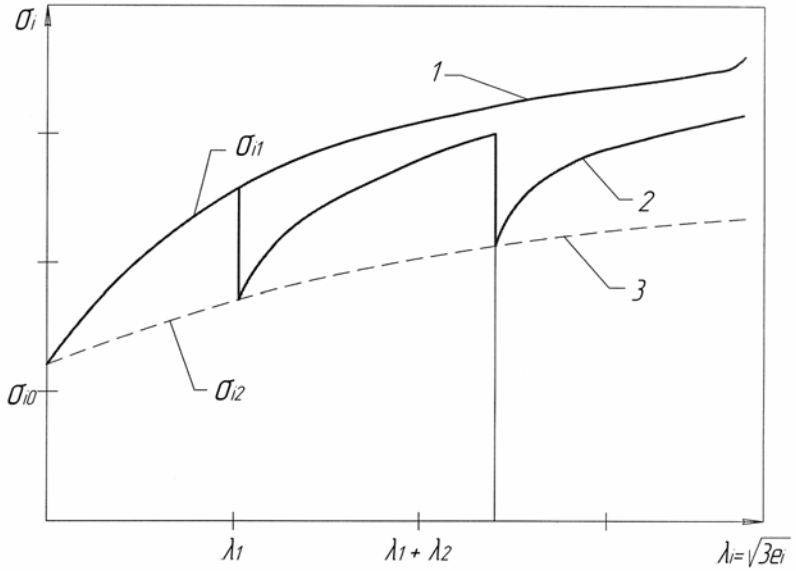


Рис. 3.3. Схема диаграмм $\sigma_i - e_i$ при квазимонотонном прямом и знакопеременных обратных нагружениях

В работе А. Богатова даны рекомендации по построению вместо ломаной сглаженной диаграммы *3*, учитывающей также эффект Баушингера, с использованием для ее построения аналитической аппроксимации

$$\sigma_{ii} = \alpha_0 \left[(\sigma_{0,2})_i + b\left(\sqrt{3} e_{ii}\right)^n \right], \qquad (3.35)$$

где

$$\alpha_0 = \frac{\int\limits_0^{e_{i-1}} \left[\left(\sigma_{0,2}\right)_{(i-1)} + \left(b\sqrt{3}e_{i-1}\right)^n \right] de_i + \sum\limits_{i=1}^{n} \int\limits_0^{e_i} \left[\alpha_1 \left(\sigma_{0,2}\right)_i + b\left(\sqrt{3}e_{ii}\right)^n \right] de_i}{\int\limits_0^{e_{i\Sigma}} \left[\sigma_{0,2} + b\left(\sqrt{3}e_{ii}\right)^n \right] de_i}.$$

Следовательно, для определения закона упрочнения металла в технологическом процессе необходимо найти четыре эмпирических коэффициента, характеризующих способность материала к упрочнению: $\sigma_{0,2}$, b, n, β; из решения краевой задачи выделить вдоль траектории движения материальной частицы участки квазимонотонной деформации, рассчитать на них степень деформации, вычислить коэффициенты α_i и α и по формуле (3.35) найти искомую кривую.

В табл. 3.1 приведены значения перечисленных выше коэффициентов для некоторых материалов с учетом вида и состояния материала полуфабриката.

Таблица 3.1

Характеристики деформационного упрочнения малоуглеродистых сталей (по данным А. Богатова)

Вид исходного материала, режим обработки	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	n	β*	a_0
Ст. 10, горячекатаная труба, отжиг 950°С, выдержка 20 мин	280	261,3	0,632	0,440	2,37
Ст. 20, горячекатаная труба, отжиг 950°С, выдержка 20 мин	280,3	418,3	0,390		2,80
Латунь Л68, горячепрессованная труба	104,4	380,9	0,501		2,06
Латунь Л63, горячепрессованная труба	112,1	414,9	0,415		1,98

* Дано среднее значение коэффициента, рассчитанное по результатам испытаний при различных степенях накопленной деформации, количестве циклов нагружений и величине гидростатического давления.

В случае применения завершенных технологических циклов, т.е. с промежуточной термообработкой (рис. 3.4), для построения кривых можно использовать соотношения (3.33)...(3.35), но с введением вместо единичных степеней деформаций $e_{i\text{-}1}$, e_1 накопленных эффективных деформаций, определяемых по формулам (3.18)...(3.23).

Так, после подстановки в (3.33) вместо $e_{i\text{-}1}$ значения $(e_{i\text{эф}})_i$ из (3.21) накопленную за $N_{\text{ц}}$ завершенных циклов эффективную деформацию получим при α = 1:

$$\sigma_{ii} = \beta\left\{\sigma_{0,2} + b\left(\sqrt{3}\right)^n \left[\sum_{i=1}^{N-1} e_{(i-1)} \prod_{i=1}^{N-1}\left(1 - K_{\text{т}(i-1)}\right)\right]^{\frac{n}{1+n}}\right\} + b\left(\sqrt{3}\right)^n e_{ii}^n . \quad (3.36)$$

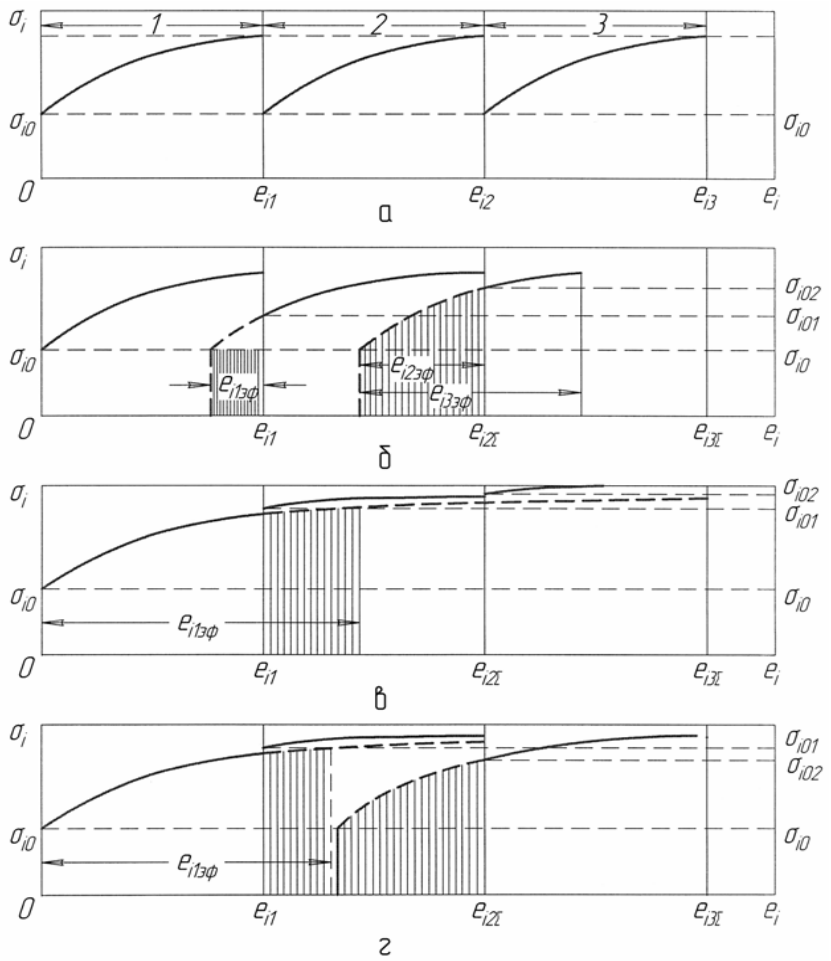


Рис. 3.4. Схемы диаграмм $\sigma_i - e_i$ при многооперационном (многопереходном) деформировании с промежуточной термообработкой: *а* – с полной разупрочняющей; *б* – с неполной разупрочняющей; *в* – с упрочняющей; *г* – с комбинированной

Аналогичный подход содержится в работах Г.Д. Деля. Предлагается следующая модель кривой течения металла, учитывающей накопленную эффективную деформацию при применении промежуточной термической обработки:

$$\sigma_{ii} = \sigma_{i0}(e_{i\text{эф}\Sigma})\frac{1+\beta(e_{i\text{эф}\Sigma})}{1+\beta(e_{ii})}, \qquad (3.37)$$

где $\sigma_{i0}(e_{i\text{эф}\Sigma})$ – уравнение кривой течения при монотонном деформировании, учитывающей накопленную эффективную степень деформации; e_{ii} – степень деформации на i-м незавершенном цикле (приращение накопленной деформации).

Соотношения (3.36), (3.37) позволяют определять сопротивление материалов пластическому деформированию на любой стадии комплексного технологического процесса изготовления деталей.

3.4. Модель коэффициента использования ресурса пластичности (поврежденности) материала

На основании сформулированных в подразд. 3.1 положений комплексной технологии, понятий о предельных состояниях металла и соотношений (2.49), (2.5) (п. 2.4.2) составим уравнение баланса ресурса пластичности, справедливого в пределах жизненного цикла изделия:

$$\omega_{i\text{т}}^{j} + \omega_{i\text{э}}^{j} = 1, \qquad (3.38)$$

где $\omega_{i\text{т}}$, $\omega_{i\text{э}}$ – коэффициенты использования ресурса пластичности, характеризующие технологическую и эксплуатационную поврежденности металла изделия; $j = 1, 2, ..., k$ – индекс расчетного сечения по чертежу детали.

Технологическая поврежденность включает в себя возможную остаточную поврежденность металла исходного листового проката ω_{i0}, исходной заготовки ω_{i3} и накапливаемую поврежденность при реализации всех технологических циклов (завершенных и незавершенных) обработки определенного конструктивного элемента детали в расчетном сечении j, т.е.

$$(\omega_{i\text{т}}^{j})_{\Sigma} = \omega_{i0} + \omega_{i3} + \sum_{i=1}^{N}\omega_{ii}. \qquad (3.39)$$

В соответствии с введенным выше понятием эффективной степени деформации и полученными соотношениями (3.18)... ...(3.22)

для оценки этой поврежденности при любом i-м числе технологических циклов запишем:

$$(\omega_{i\text{т}}^{j})_{i\Sigma} = \left[\frac{(e_{i\text{эф}}^{j})_i}{(e_{i\text{р}}^{j})_i - (e_{i\text{эф}}^{j})_{i-1}} \right]^{a_i}, \qquad (3.40)$$

где $(e_{i\text{р}}^{j})_i$ – предельная до разрушения степень деформации при монотонном деформировании на i-м цикле материала, термически обработанного по режиму предшествующей термообработки.

Величины эффективной степени деформации $(e_{i\text{эф}}^{j})_{i-1}, (e_{i\text{эф}}^{j})_i$ рассчитываются по формулам (3.21) и (3.22), соответственно.

Физической основой феноменологической теории разрушения и полученных математических моделей поврежденности металла (2.49), (2.50), (3.39), (3.40) является экспериментально установленная связь между разрушением и пластической деформацией. Разрушение материала при нагружении всегда сопровождается пластической деформацией, проявляющейся в микро- и макромасштабе. В процессе деформации образуются различного рода дефекты (точечные, линейные, плоские, объемные), т.е. формируется поврежденность металла, которая развивается вплоть до макроразрушения ($\omega_i = 1$) вследствие роста этих дефектов. Количественное изменение в пределах одного вида дефектов (например, субмикротрещин, находящихся в упругом равновесии с матрицей материала) приводит к возникновению качественно новых видов дефектов (например, микропор и микротрещин, которые упруго разгружены относительно матрицы структуры металла). На основе этих закономерностей в феноменологической теории разрушения постулированы следующие положения.

1. В наиболее общем случае при постоянных значениях параметров процесса пластической деформации (K, v_σ, t, ε_i) интенсивность накопления поврежденности можно описать степенной функцией

$$\frac{d\omega_i}{de_i} = \frac{ae^{a-1}}{e_{i\text{р}}^{a}}, \qquad (3.41)$$

согласно которой эта величина изменяется в интервале значений

$$0 \le \frac{d\omega_i}{de_i} \le \frac{d\omega_i}{de_{i\max}} \qquad (3.42)$$

при изменении степени деформации в пределах $0 \le e_i \le e_{i\text{р}}$.

2. Предельная до разрушения степень деформации $e_{i\text{р}}$ является первым определяющим фактором феноменологической теории разрушения, устанавливаемым экспериментально и зависящим от температуры t и скорости $\dot{\varepsilon}_i$ процесса, коэффициента жесткости схемы напряженного состояния $K = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/\sigma_i$ или $K = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/\sigma_i\sqrt{3}$), коэффициента Лоде-Надаи $v_\sigma = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$, характеристических параметров структуры X_i содержания химических элементов в сплаве C_j и некоторых других факторов, т.е.

$$e_{i\text{р}} = e_{i\text{р}}\,(\varepsilon_{i\text{р}}, K, v_\sigma, t, \varepsilon_i, X_i, C_j\,); \qquad (3.43)$$

3. Показатель «a» является вторым определяющим фактором теории разрушения, зависящим, в основном, от перечисленных выше факторов:

$$a = a\,(K, v_\sigma, t, \varepsilon_i, X_i, C_j\,). \qquad (3.44)$$

Следовательно, основой для расчета поврежденности и прогнозирования микро- и макроразрушения металла служат базовые уравнения феноменологической теории разрушения (3.41)...(3.44), характеризующие зависимость показателей $e_{i\text{р}}$ и a от термомеханических параметров процесса обработки материала детали.

Поврежденность металла при монотонной или квазимотонной деформации может быть определена интегрированием уравнения (3.41) в нелинейной постановке при постоянном значении параметров K, v_σ, t, ε_i:

$$\omega_i = \int_0^{e_i} \frac{a e_i^{a-1}}{e_{i\text{р}}^{a}}\, de_i\,. \qquad (3.45)$$

На рис. 3.5 показаны, по А. Богатову, схемы, иллюстрирующие изменение параметров $(d\omega_i)/(de_i)$ и ω_i в зависимости от степени деформации для менее благоприятной (линия *1*, $K > 0$) и более благоприятной (линия *2*, $K < 0$) схемы напряженного состояния. Линия *3* характеризует значение интенсивности накопления поврежденности в момент макроразрушения металла $\omega_i = 1$).

Схемы, иллюстрирующие изменение интенсивности накопления поврежденности $(d\omega_i)/(de_i)$ и величины поврежденности при циклической обработке материала заготовки приведены на рис. 3.6. В начале каждого технологического цикла обработки $(d\omega_i)/(de_i)$=0 и увеличивается по зависимости, близкой к линейной,

до своего максимального значения, которое зависит от накопленной степени эффективной деформации на i-м цикле обработки.

Величину предельной до разрушения степени деформации представим в виде двучленного выражения

$$e_{i\text{р}} = e_{i\text{у}} + \Delta e_{i\text{р}}, \qquad (3.46)$$

где $e_{i\text{у}}$ – величина предельной до потери устойчивости пластической деформации; $\Delta e_{i\text{р}}$ – величина локальной (сосредоточенной) деформации.

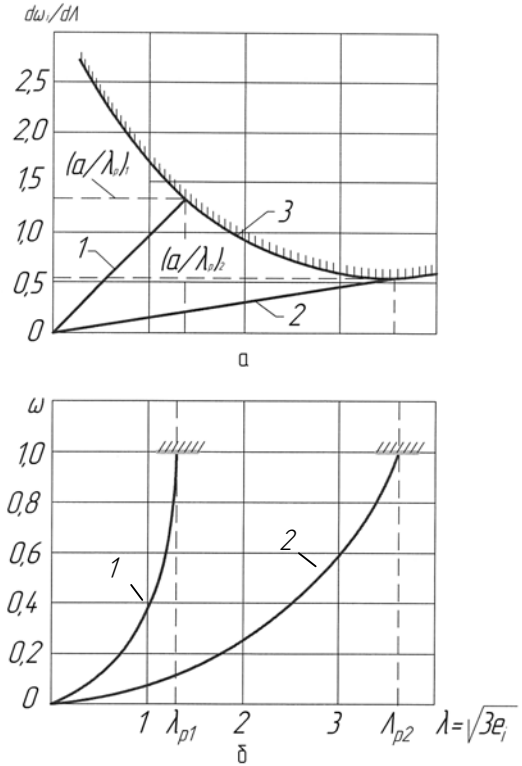


Рис. 3.5. Зависимость параметров поврежденности $d\omega_i/d\lambda_i$ (*а*) и ω_i (*б*) от степени деформации $\lambda_i(e_i)$ для благоприятной (*2*) и менее благоприятной (*1*) схем напряженного состояния

Отметим, что в процессах листовой штамповки важную роль в ограничении процессов играет именно параметр $e_{i\text{у}}$.

Предельная до потери устойчивости степень деформации в процессах листовой штамповки оценивается для изотропного листового материала по известным соотношениям:

• при плоском напряженном состоянии одного знака – двустороннем растяжении

$$e_{iy} = \frac{2n\sqrt{1 - m_\sigma + m_\sigma^2}}{2 - m_\sigma} = \frac{2n\sqrt{3 + \nu_\sigma^2}}{3 - \nu_\sigma}; \qquad (3.47)$$

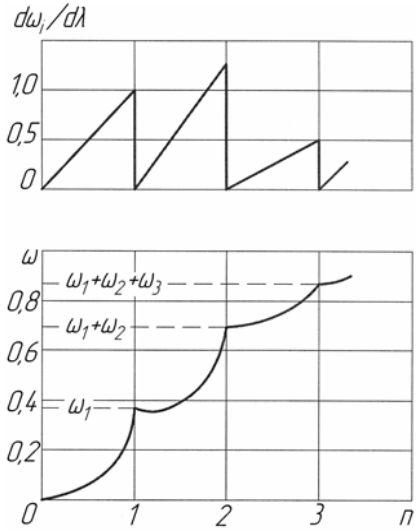


Рис. 3.6. Схема влияния числа циклов обработки на параметры поврежденности металла $d\omega_i/d\lambda_i$ и ω_i

• при разноименном плоском напряженном состоянии (сжимающее и растягивающие напряжения)

$$e_{iy} = \frac{2n\sqrt{1 - m_\sigma + m_\sigma^2}}{2 + m_\sigma}, \qquad (3.48)$$

где $m_\sigma = \sigma_\theta / \sigma_p \le 1$; $n = \varepsilon_{iy}$ – коэффициент, характеризующий способность материала к деформационному упрочнению; ε_i – интенсивность деформации в момент образования шейки при испытании образца на растяжение; $v_\sigma = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ – параметр Лоде-Надаи.

Известны и другие рекомендации по определению e_{iy}. Ранее в работах П.В. Бриджмена и Я.Б. Фридмана отмечалось, что наибольшая равномерная деформация при испытании металлов на растяжение остается неизменной с ростом гидростатического давления, т.е. с изменением коэффициента жесткости схемы напря-

женного состояния K, тогда как локальная (сосредоточенная) в шейке образца значительно возрастает.

В то же время анализ уравнения (3.47) показывает, что величина e_{iy} с увеличением коэффициента жесткости схемы напряженного состояния K будет возрастать. Действительно, из выражения по определению коэффициента K для плоского напряженного состояния следует:

$$K = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{\sigma_i} = \frac{\sigma_\rho}{\sigma_i}\left(1 + \frac{\sigma_\theta}{\sigma_\rho}\right). \qquad (3.49)$$

Принимая из условия пластичности для одноименного напряженного состояния $\sigma_\rho = \sigma_i$ и $m_\sigma = \sigma_\theta / \sigma_\rho$, запишем:

$$m_\sigma = K - 1. \qquad (3.50)$$

После подстановки (3.50) в (3.47) получим

$$e_{iy} = \frac{2n}{(3-K)}\left[3(1-K) + K^2\right]^{1/2}. \qquad (3.51)$$

Из формулы (3.51) видно, что при изменении коэффициента K в пределах от 1 до 2 e_{iy} увеличивается вдвое. Многочисленные исследования свидетельствуют о значительном влиянии схемы напряженного состояния K на предельную до разрушения деформацию e_{ip}. С увеличением коэффициента K, т.е. при переходе от «мягких» схем ($K < 0$) к «жестким» ($K > 0$), значения e_{ip} для большинства материалов, в отличие от e_{iy}, уменьшаются (рис. 3.7).

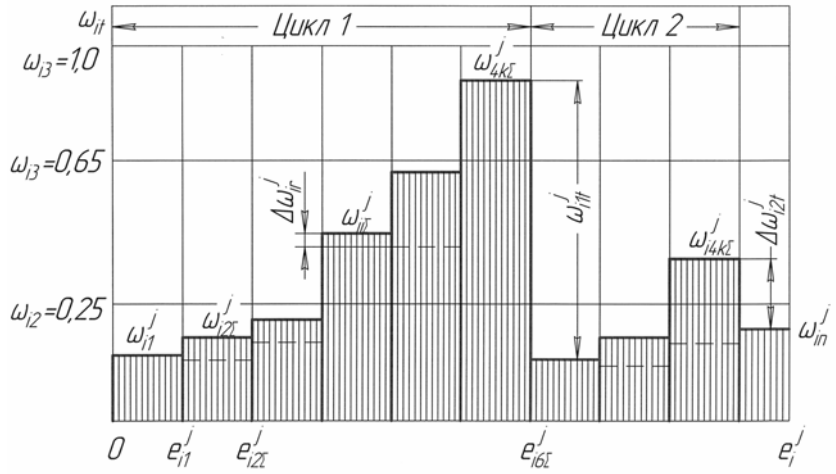


Рис. 3.7. Схема формирования технологической поврежденности ω_i металла

изделия в расчетном сечении j

Поэтому из равенства (3.46) следует, что характер зависимости $e_{i\text{р}} = e_{i\text{р}}(K)$, в основном, определяется зависимостью локальной (сосредоточенной) деформации от показателя жесткости схемы напряженного состояния $\Delta e_{i\text{р}} = \Delta e_{i\text{р}}(K)$.

Первые предложения по аппроксимации эмпирических диаграмм $e_{i\text{р}} = e_{i\text{р}}(K)$ даны в виде линейной, а затем экспоненциальной зависимости вида

$$e_{i\text{р}} = B \exp CK, \tag{3.52а}$$

где B, C – коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов и зависящие от химического состава и структуры металла.

Так, в работах Г.А. Смирнова-Аляева и А.В. Лабутина числовые значения коэффициентов равны:

$$B = 2\varepsilon_{i\text{р}},\ C = -0{,}72. \tag{3.52б}$$

После подстановки значения $e_{i\text{р}}$ из (3.51), (3.52) в (3.46) получим

$$\Delta e_{i\text{р}} = e_{i\text{р}} - e_{iy} = 2\varepsilon_{i\text{р}} \exp CK - 2\varepsilon_{iy} \frac{\sqrt{3+\nu_\sigma^2}}{3-\nu_\sigma^2},$$

откуда

$$\Delta e_{i\text{р}} = 2\varepsilon_{i\text{р}} \left(\exp CK - \frac{\varepsilon_{iy}\sqrt{3+\nu_\sigma^2}}{\varepsilon_{i\text{р}}(3-\nu_\sigma^2)} \right). \tag{3.53}$$

Полученное соотношение показывает, что при ν_σ = const и ε_{iy}, $\varepsilon_{i\text{р}}$ = const степень локальной деформации зависит только от коэффициента жесткости схемы напряженного состояния. В то же время при увеличении ν_σ она уменьшается. Более объективные зависимости $\Delta\ e_{i\text{р}} = \Delta e_{i\text{р}}(K)$ могут быть получены при непосредственном исследовании показателей предельной до потери устойчивости $e_{iy} = e_{iy}(K)$ и локальной деформации $\Delta e_{i\text{р}} = \Delta e_{i\text{р}}(K)$. В качестве гипотетической модели предлагается соотношение

$$\Delta e_{i\text{р}} = b_\wedge \varepsilon_{iy} \left(\frac{\varepsilon_{i\text{р}}}{\varepsilon_{iy}} - 1 \right) \exp C_\wedge K\ . \tag{3.54}$$

Тогда с учетом (3.46) получим

$$e_{i\text{р}} = \varepsilon_{i\text{у}}\left[T_a + b_\wedge\left(\frac{\varepsilon_{i\text{р}}}{\varepsilon_{i\text{у}}} - 1\right)\exp C_\wedge K\right], \qquad (3.55)$$

где $T_a = T_a(v_\sigma)$ определяется по соотношениям (3.47), (3.48); $b_\wedge, C_\wedge$ – коэффициенты, определяемые опытным путем.

Уравнение (3.55) удовлетворяет условиям

$$e_{i\text{р}} = \varepsilon_{i\text{у}} T_\alpha \text{ при } \varepsilon_{i\text{у}}/\varepsilon_{i\text{р}} = 1 \text{ и } e_{i\text{р}} \geq e_{i\text{у}}\,. \qquad (3.56)$$

В этом случае из (3.54) следует, что $\Delta e_{i\text{р}} = 0$. В соотношении (3.40) знаменатель характеризует предельную до разрушения степень деформации $(e^j_{i\text{р}})_i - (e^j_{i\text{эф}})_{i\text{-}1}$ при условии

$$(e^j_{i\text{эф}})_i < (e^j_{i\text{р}})_i - \Delta e_{i\text{т}}, \qquad (3.57)$$

где $\Delta e_{i\text{т}}$ – минимальное устойчивое приращение деформации на переходе – зависит от параметра неоднородности, отношения главных деформаций, минимального значения коэффициента Баушингера β) и задается интервалом значений 0,02 – 0,05.

Если условие (3.57) не выполняется, то принимается

$$(e^j_{i\text{р}})_i = \Delta e_{i\text{т}}. \qquad (3.58)$$

Другая, по сравнению с (3.39), (3.40), модель оценки технологической поврежденности металла при циклической обработке предполагает учет эффективности влияния термообработки за счет введения коэффициентов восстановления ресурса пластичности. Технологическая поврежденность включает в себя возможную остаточную поврежденность металла исходного листового проката $\omega_{i\text{о}}$, исходной заготовки $\omega_{i\text{з}}$ и накапливаемую поврежденность при реализации полной технологии изготовления конструктивного элемента оболочки в расчетном сечении j, т.е.

$$\omega^j_{i\text{т}} = \omega_{i\text{о}} + \omega^j_{i\text{з}} + \sum_i^{N_{\text{зц}}}\left(\sum_{q=1}^{N_{\text{п}}}\omega^j_{iq} - \Delta\omega^j_{iq}\right) + \sum_i^{N_{\text{нц}}}\left(\sum_{i=1}^{N_{\text{п}}}\omega^j_{ir} - \Delta\omega^j_{ir}\right)\omega_{ii}. \qquad (3.59)$$

где $N_{\text{зц}}$ – количество завершенных технологических циклов обработки (за цикл принимается совокупность последовательно выполняемых операций: одной штамповочной и одной термической); $N_{\text{нц}}$ – количество незавершенных циклов (без термической обработки); $N_{\text{п}}$ – число переходов; q, r – номера переходов в завершенном и незавершенном циклах; $\omega^j_{iq}, \omega^j_{ir}$ – коэффициенты ис-

пользования ресурса пластичности на переходах q и r, соответственно; $\Delta\omega_{iq}^{j}, \Delta\omega_{ir}^{j}$ – коэффициенты восстановления ресурса пластичности, учитывающие залечивание дефектов металла при термической обработке и разгрузке, соответственно.

Эксплуатационная поврежденность $\omega_{iэ}$ в (3.38) определяется как сумма возможной поврежденности металла при длительном хранении, транспортировании $\omega_{iх}$ и функционировании $\omega_{iф}$:

$$\omega_{iэ}^{j} = \omega_{iх}^{j} + \omega_{iф}\,. \qquad (3.60)$$

Для изделий многоразового использования (ремонтируемых и восстанавливаемых) можно записать

$$\sum_{p=1}^{N_{жц}} \omega_{ip\Sigma}^{j} = 1\,, \qquad (3.61)$$

где p – номер «жизненного» цикла (после очередного восстановления); $N_{жц}$ – количество «жизненных» циклов изделия до его разрушения; $\omega_{ip\Sigma}^{j}$ – накопленная остаточная поврежденность металла на K-цикле.

Для изделий одноразового использования (неремонтируемых и невосстанавливаемых) $N_{жц} = 1$.

Уравнение (3.38) характеризует полное использование ресурса пластичности до наступления макроразрушения. Исключение разрушения металла изделия можно гарантировать с определенной вероятностью, если записать (3.38), (3.61) в виде неравенств

$$\omega_{iт} + \omega_{iэ} \le [\omega_i], \qquad (3.62а)$$

$$\sum_{p=1}^{N_{жц}} \omega_{ip\Sigma}^{j} < [\omega_{i\Sigma}] < 1, \qquad (3.62б)$$

где $[\omega_i]$, $[\omega_{i\Sigma}]$ – допустимые значения коэффициентов использования ресурса пластичности.

В приведенных соотношениях величины ω_{io}, $\omega_{iэ}$, ω_{iq}, ω_{ir} рассчитываются по формулам вида (3.45), основанным на использовании нелинейного закона накопления поврежденности металла с увеличением степени деформации e_i.

Рассматривая предельную до разрушения степень деформации $e_{iр}$ как случайную величину и принимая, что закон ее распределения не противоречит нормальному, можно записать

$$\omega_i = \int_0^{e_i} \frac{a e_i^{a-1} de_i}{e_{ip}^a \left[1 - S_{e_i} / e_{ip}(K)\varphi(P)\right]^a}, \qquad (3.63)$$

где e_{ip} – среднее выборочное значение предельной до разрушения степени деформации; S_{e_i} / e_{ip} – коэффициент вариации; S_{e_i} – среднеквадратичное отклонение e_{ip}; $\varphi(P)$ – обратная функция нормированного распределения, табличная величина (при P = = 99,7 %, $\varphi(P) = 3$).

Допустимые значения коэффициентов использования ресурса пластичности $[\omega_i]$, $[\omega_{i\Sigma}]$ (3.62) следует назначать с учетом условий функционирования изделий и ограничения деформации в процессах обработки.

В соответствии с представлениями феноменологической теории разрушения условия ограничения деформации и появления технологических и (или) функциональных отказов заготовок (изделий) связаны с условиями достижения металлом предельных состояний. Условие перехода через предельное состояние определено соотношением (2.45). Ранее показано наличие функциональной связи между параметрами обобщенной работы и коэффициентом использования ресурса пластичности.

На этом основании условие перехода через любое K–предельное состояние можно выразить следующим образом:

$$\omega_{i\Sigma} \geq \omega_{ik} \ (k = 1, 2, 3, 4), \qquad (3.64)$$

где $\omega_{i\Sigma}, \omega_{ik}$ – накопленное и критическое значения коэффициента использования ресурса пластичности.

В результате выполненных экспериментальных исследований определены критические значения безразмерного параметра, характеризующего относительную поврежденность металла. Поэтому в общем случае допустимое значение коэффициента использования ресурса пластичности определяется в зависимости от величины ω_{ik}, т.е.

$$[\omega_{ik}] = \frac{\omega_{ik}}{K_\omega}, \qquad (3.65)$$

где K_ω – коэффициент запаса по этому параметру.

В модели (3.59) рекомендуется принимать следующие значения коэффициента восстановления ресурса пластичности:

$$\Delta\omega_{it}^j = \omega_i^j \text{ при } \Delta\omega_i^j \leq 0{,}25, \qquad (3.66а)$$

$$\Delta\omega_{it}^{j} = 0{,}125 + 0{,}5\,\omega_i \text{ при } 0{,}25 < \omega_i < 0{,}65, \qquad (3.66б)$$

$$\Delta\omega_{it}^{j} = 1{,}3\,(1-\omega_i) \text{ при } 0{,}65 < \omega_i^{j} \le 1{,}0\,. \qquad (3.66в)$$

Соотношения (3.66) получены на основе аппроксимации опытных графических зависимостей для малоуглеродистой стали.

При отсутствии термообработки между переходами в первом приближении принимается

$$0 \le \Delta\omega_{ir}^{j} \le 0{,}01\ldots0{,}03. \qquad (3.67)$$

На рис. 3.7 в качестве примера показана схема формирования показателя ω_i для двухциклового технологического процесса. Общий подход к решению задачи оценки эксплуатационной повреждаемости металла изделия изложен в п. 2.4.4.

3.5. Модели предельных состояний металла детали при пластической деформации

В соответствии с предложенной гипотезой о существовании при деформировании металла характерных стадий и предельных состояний и энергетическим условием перехода определены критические значения параметров, отвечающие предельным состояниям. Энергетическое условие достижения первого предельного состояния (k =1) имеет следующий вид:

$$Q_i \ge Q_1, \quad Q_1 = A_i \pm Q_{д1}\,. \qquad (3.68)$$

Параметры первого предельного состояния определяются соотношениями:

$$A_{i\text{уд}} = \frac{1+\mu}{3E}\sigma_{i1}^{2}; \quad Q_{д1} = (t_0 + \Delta t_1)\alpha\sigma_{i1}; \quad E_{\sigma 1} = \frac{E_k}{\sigma_{i1}}; \quad \omega_{i1} = \frac{e_{i1}^{a}}{e_{i\text{р}}}\,,$$

(3.69)

где σ_{i1} – интенсивность напряженного состояния, соответствующая остаточной деформации e_{i1} (условный $\sigma_{0,2}$ или физический $\sigma_т$ предел текучести); e_{i1} – степень деформации, отвечающая первому предельному состоянию; t_0 – абсолютная температура тела до деформации; $\Delta t_1 = -(\alpha t_0 \Delta\sigma_i/(J_{c\rho})$ – изменение температуры деформируемого тела; α – линейный коэффициент теплового расширения; c, ρ – теплоемкость и плотность.

За второе предельное состояние (k = 2) принимаем момент исчерпания устойчивости пластического деформирования (пластической устойчивости) в конце третьей стадии процесса. Внешним

проявлением потери устойчивости этого вида служит формирование выраженной макронеоднородности деформации, например локальных утонений при вытяжке или сдвиговых деформаций при обжиме. На стадии устойчивого пластического деформирования рост напряжений сопровождается интенсивным упрочнением. При этом деформационное упрочнение обусловлено повышением уровня потенциальной энергии связи за счет накопления поглощенной (скрытой) энергии. Поглощенную энергию определяют по разнице затраченной при деформации работы и рассеянной энергии упругой деформации и выделившегося тепла (или по количеству тепла, выделившегося при нагреве деформированного тела). Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что накопление энергии деформирования приводит к изменению внутренней энергии и необратимому изменению дислокационной структуры и тонкого кристаллического строения металла. С увеличением степени деформации до граничного для этой стадии значения наблюдается выраженная тенденция к торможению роста плотности дислокаций, формируется ячеистая структура металла. Для сформированной ячеистой структуры характерна высокая напряженность и неоднородность в распределении дислокаций, а следовательно, проявление неоднородности деформации и связанное с этим резкое уменьшение интенсивности деформационного упрочнения. При переходе через второе предельное состояние достигается так называемый нижний критический уровень поврежденности. Энергетическое условие перехода через второе предельное состояние представлено в виде

$$Q_i \geq Q_2 = A_{2\text{уд}} - A_{1\text{уд}} - Q_{\text{д}2}, \qquad (3.70)$$

где Q_2 – второе предельное значение обобщенной работы; $A_{2\text{уд}}$ – удельная механическая работа изменения формы, отвечающая моменту достижения второго предельного состояния; $Q_{2\text{уд}}$ – удельная работа диссипаций, соответствующая второму предельному состоянию.

Принимая в уравнении (3.2) $\Phi(\varepsilon_i)$ в виде степенной функции $\sigma_i = A\varepsilon_i^n$ и $\varepsilon_i = \varepsilon_{i\text{уд}}$, получим

$$\sigma_{i2} = \sigma_{i\text{у}}(e_{i\text{у}});\ A_{2\text{уд}} = \sigma_{i\text{у}}\frac{e_{i\text{у}}}{(1+e_{i\text{у}})} = \sigma_{i\text{у}}\frac{e_{i\text{р}}}{(1+n)}\omega_{i2}^{1/a};\ E_{\sigma_2} = 1{,}0;$$

$$\omega_{i2} = \omega_{i\text{у}} = \left(\frac{e_{i\text{у}}}{e_{i\text{р}}}\right)^a; \; Q_{2\text{д}} = A_{2\text{уд}} \cdot \eta_2(e_{i\text{у}}), \qquad (3.71)$$

где $\eta_2(e_{i\text{у}})$ – коэффициент выхода тепла.

В соответствии с рассмотренными выше положениями о накопленной степени эффективной деформации и соотношениями (3.21), (3.22) для циклического процесса, можно записать:

$$(e_{i\text{у}})_i = e_{i\text{у}} - (e_{i\text{эф}})_i \text{ при } (e_{i\text{эф}})_i < e_{iy} - \Delta e_{i\text{т}},$$
$$\text{и } (e_{i\text{у}})_i = \Delta e_{i\text{т}} \text{ при } (e_{i\text{эф}})_i \le e_{iy} - \Delta e_{i\text{т}},$$
$$(3.72)$$

где $e_{i\text{т}} = 0{,}02\ldots0{,}05$.

В работах Г. Деля предельная до потери устойчивости деформация при многопереходном (циклическом) деформировании определяется по соотношению

$$\left(e_{i\text{у}}\right)_i = e_{iy} - \frac{\left(e_{i\text{эф}}\right)_{i-1}}{f\left(\alpha_i\right)}, \qquad (3.73)$$

где $f\left(\alpha_i\right) = \sqrt{\frac{2(2+R)(1+R)}{3(1+2R)}\left[1 + \frac{2R}{1+R}\alpha + \alpha^2\right]}$ для трансверсально-изотропного материала; R – параметр анизотропии; $\alpha = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$ – отношение главных деформаций.

Переход через третье предельное состояние (k = 3) характеризуется завершением процесса накопления скрытой (поглощенной) энергии, достижением в зонах локализации деформации верхнего критического уровня поврежденности металла, сопровождаемого формированием технологически неисправимых полостных макродефектов и пористой структуры, дальнейшей локализацией деформации и гашением деформационного упрочнения. Согласно исследованиям, нижний критический уровень поврежденности металла (для второго предельного состояния) характеризуется образованием термически устойчивых микропор и микротрещин, имеющих размер, близкий к размеру ячеистой структуры. Коэффициент использования ресурса пластичности для этого уровня составляет: $\omega_{i2} = \omega_{i\text{у}}$=0,20...0,30. Числовое значение коэффициента использования ресурса пластичности для третьего предельного состояния равно: ω_{i3} = 0,60...0,70.

Этому уровню поврежденности отвечают дефекты, соизмеримые с размерами деформированного зерна или фрагмента структуры в металле. Полостные дефекты развиваются и растут, формируя зону предразрушения. На четвертой стадии механизм деформирования мало изменяется, но интенсивно протекают процессы формирования макротрещин путем объединения микронарушений сплошности металла при достижении критического значения пластического разрыхления металла. В момент разрушения $\omega_{i4} = 1{,}0$.

Энергетические условия перехода через третье и четвертое предельные состояния имеют аналогичный (3.71) вид с заменой индекса $k = 2$ на $k = 3$ и $k = 4$, соответственно.

С учетом изложенного характеристики третьего предельного состояния определяются по следующим соотношениям:

$$\sigma_{i3} = \sigma_{iy} \cdot 2^n (1 + 0{,}5 e_{i3} - e_{iy}) \text{ при } 2\varepsilon_{iy} \le \varepsilon_i \le e_{ip};$$

$$A_{3уд} = \sigma_{iy} \frac{e_{i3}^{1+n}}{(1+e_{iy})} = \sigma_{iy} \frac{e_{ip}}{(1+n)} \frac{\omega_{i3}^{(1+n)/a}}{\omega_{i2}^{n/a}},$$

$$E_{\sigma_3} = n / e_{i3} = e_{iy} / e_{i3} = (\omega_{i2} / \omega_{i3})^{1/a}; \qquad (3.74)$$

$$\omega_{i3} = (e_{i3} / e_{ip})^a.$$

Четвертое предельное состояние соответствует макроразрушению, при этом

$$\sigma_{i4} = \sigma_{ip}(e_{ip}) = \sigma_{iy} \cdot 2^n (1 + 0{,}5 e_{ip} - e_{iy});$$

$$A_{4уд} = \frac{\sigma_{iy} e_{ip}^{1+n}}{e_{iy}(1+n)} = \sigma_{iy} \frac{e_{ip}}{(1+n)} \frac{1}{\omega_{i2}^{n/a}};$$

$$E_{\sigma_4} = n / e_{ip} = e_{iy} / e_{ip} = \omega_{i2}^{1/a}; \qquad (3.75)$$

$$\omega_{i4} = \omega_{ip} = 1{,}0.$$

Для циклических процессов оценка e_{i3} и e_{i4} должна выполняться с учетом накопленной эффективной степени деформации (3.40), (3.57), (3.58).

С использованием полученных характеристик может быть построена диаграмма предельных состояний металла в координатах $E_{\sigma i} - \omega_i$. Вид этой кривой зависит от природы металла (коэффициента «*a*») и, возможно, условий деформирования (t, ε_i^j) и, соглас-

но принятой гипотезе, характеризует четыре вида предельных состояний с уровнями поврежденности металла (см. рис. 2.1):

$$\omega_{i0} = 0;\ \omega_{i2} = \omega_{iy} = 0{,}25;\ \omega_{i3} = 0{,}65;\ \omega_{i4} = 1{,}0. \qquad (3.76)$$

3.6. Модели формирования механических свойств материалов металлических элементов патронов

Надежное функционирование нагружаемых тонкостенных металлических оболочек возможно лишь в том случае, если их материал обладает требуемыми по условиям эксплуатации механическими свойствами. Придание материалу детали свойств, заданных техническими условиями, является одной из основных функций технологического процесса изготовления этой детали. При этом желательно для обеспечения контроля технологии знать характеристики механических свойств материала детали на различных стадиях проектирования технологических процессов и ее изготовления. Так, прогнозирование характеристик механических свойств материала заготовок позволяет оценить его штампуемость и эксплуатационную прочность.

Следовательно, прогнозирование механических свойств материала нагружаемых элементов патронов на любой стадии технологического процесса является весьма важной и чрезвычайно сложной задачей. В общем виде невозможно составить систему уравнений, в полной мере учитывающую и описывающую все явления, участвующие в формировании физико-механических свойств металлической детали, изготавливаемой в результате комплексного технологического процесса.

В соответствии с рассмотренными выше положениями комплексный ТП представляет собой сочетание физически разнородных методов обработки. Однако при этом базовым методом служит обработка давлением, всегда определяющая формирование физико-механических свойств материала оболочки вследствие деформационного упрочнения (наклепа) металла при пластической деформации. Деформационному упрочнению может сопутствовать разупрочнение, вызываемое прежде всего применением различных методов термообработки и протекающих при этом явлений, а именно: возврата, рекристаллизации, фазовой перекристаллизации (переход из одной модификации в другую). Последняя обычно вызывает скачкообразные изменения уровня свойств и состояния материала, сопровождается эффектом изменения объ-

ема и связанным с ним фазовым наклепом, разориентировкой структуры и другими эффектами. Могут влиять также и другие процессы, явления и эффекты более специфического характера, такие, например, как эффект Баушингера, гетерогенность структуры со значительной разницей свойств структурных составляющих, масштабный фактор и др. Большинство из перечисленных процессов, эффектов и явлений влияют не только на средний уровень свойств, но и на состояние приобретенной анизотропии физико-механических свойств материала, проявление которой обусловлено, главным образом, наличием какого-то преимущественного направления течения материала в процессе его обработки давлением.

В силу изложенного не существует единой теории формирования механических свойств детали, изготавливаемых из конструкционных металлических материалов с применением выше описанной комплексной технологии, хотя имеются работы, трактующие изменение свойств при пластической деформации с позиций теории дислокаций, работы по теории формирования анизотропии свойств, теории эффекта Баушингера и др. Поэтому на практике используется феноменологический подход, учитывающий последовательное протекание процессов деформационного упрочнения и термического разупрочнения в пределах завершенного технологического цикла и основанный на применении эмпирических цикловых моделей формирования свойств при определенных правилах их «сшивания» в многоцикловых комплексных процессах.

Задача прогнозирования механических свойств материала элементов патронов сводится прежде всего к построению моделей формирования заданных характеристик этих свойств в предполагаемых опасных, с точки зрения функционирования, контролируемых зонах деталей. Поэтому построению моделей предшествует разработка типовых формализованных схем формирования этих характеристик в расчетных сечениях по ходу технологических процессов изготовления оболочек.

В содержание понятия «схема формирования механических свойств» входят понятия об исследуемых признаках качества материала – характеристиках механических свойств, технологических циклах и составе операций в циклах, технологических факторах и характере их влияния на уровень свойств обрабатываемой заготовки и детали на каждом технологическом цикле.

В соответствии с постулируемыми выше положениями (подразд. 3.1) за контролируемые и прогнозируемые признаки механических свойств оболочек приняты характеристики предельных состояний металла $\left(\sigma_{0,2}, \sigma_{\text{в}}, \sigma_{i\text{у}}, \sigma_{i\text{р}}, \varepsilon_{i\text{у}}, \varepsilon_{i\text{р}}, \psi, \delta\right)$.

Анализ типовых технологических маршрутов изготовления деталей заключается в выделении состава операций и их циклов, участвующих в формировании механических свойств материала деталей в заданных техническими условиями контрольных сечениях. Такими операциями при изготовлении оболочек являются холодноштамповочные (вытяжка без утонения, вытяжка с утонением, комбинированная вытяжка, обжим, раздача, штамповка дна и др.) и термические (полный и неполный рекристаллизационный отжиг, низкотемпературный и дорекристаллизационный отжиги, закалка, отпуск, полный и нормализационный отжиги и др.).

Определенное сочетание, режимы и последовательность этих операций позволяют получать необходимые значения характеристик механических свойств деталей. Основными технологическими параметрами, определяющими значения этих характеристик, штампуемых заготовок и деталей, являются химический состав и состояние исходного материала, степень накопленной эффективной деформации на штамповочных операциях, температура и время выдержки на термических операциях. Характеристики степени деформации для различных процессов штамповки определяются на основе анализа деформированного состояния в очагах пластической деформации, а температура и время выдержки регламентированы оптимальными режимами термообработки. Следует учитывать, что на механические свойства материала влияют, кроме перечисленных, и другие технологические параметры: колебания химического состава материала в пределах ТУ, скорость деформации и условия контактного трения на штамповочных операциях, колебания режимов термообработки и т. д. Поскольку влияние этих и других неконтролируемых факторов существенно ниже, чем основных, то они учитываются не при расчете номинальных значений характеристик свойств, а при оценке поля рассеивания их прогнозируемых значений. Понятия о технологических циклах рассмотрены выше.

Модели формирования характеристик механических свойств условно делятся на простые (цикловые) и сложные (многоцикловые).

Предлагаются три вида цикловых моделей формирования характеристик предельной прочности $\left(\sigma_{0,2}, \sigma_{\text{в}}, \sigma_{i\text{y}}, \sigma_{i\text{p}}\right)$ и предельной пластичности ($\varepsilon_{i\text{y}}, \varepsilon_{i\text{p}}, \psi, \delta$ – рис. 3.8).

1. Формирующая операция – штамповочная с единичной степенью деформации e_i. При увеличении степени деформации в процессе штамповки все характеристики прочности за счет деформационного упрочнения возрастают, а пластичности – снижаются (рис. 3.8, *а*). Уровни характеристик свойств (например, временного сопротивления $\sigma_{\text{в}}$ и относительного удлинения δ и др.) зависят от их исходных, перед началом цикла, значений $\sigma_{\text{в}0}$, δ_0 и степени деформации e_{i1}:

$$\sigma_{\text{в}} = \sigma_{\text{в}}\{\sigma_{\text{в}0}, e_{i1}\};\quad \sigma_{0,2} = \sigma_{0,2}\{(\sigma_{0,2})_0, e_{i1}\};\ \sigma_{iy} = \sigma_{iy}\{(\sigma_{iy})_0, e_{i1}\};$$
$$\sigma_{i\text{p}} = \sigma_{i\text{p}}\{(\sigma_{i\text{p}})_0, e_{i1}\};\ \ \delta = \delta\{\delta_0, e_{i1}\};\ \varepsilon_{i\text{y}} = \varepsilon_{i\text{y}}\{(\varepsilon_{i\text{y}})_0, e_{i1}\};\ \ \psi = \psi\{\psi_0, e_{i1}\}. \tag{3.77}$$

Модели (3.77) можно отнести к простым однофакторным моделям.

2. Формирующая операция – штамповка с последующим отжигом 1-го или 2-го рода (рис. 3.8, *б*). Технологические параметры: e_{i1} – степень деформации; $t_{\text{отж}}$, $\tau_{\text{отж}}$ – температура и длительность отжига.

Характеристики механических свойств с ростом степени деформации изменяются так же, как и в предыдущей модели. При последующем отжиге происходит, как правило, полное или неполное (в зависимости от принятых режимов отжига) термическое разупрочнение предварительно наклепанного металла. Однако у некоторых металлов и сплавов (например, медных и никелевых) дорекристаллизационный отжиг вызывает дополнительное упрочнение, величина которого зависит от состава твердого раствора. У многих сплавов эффект упрочнения при дорекристаллизационном отжиге возрастает с увеличением степени легирования твердого раствора.

Наиболее общей причиной упрочнения является закрепление подвижных дислокаций в исходном холоднодеформированном материале и в дислокационных стенках, возникших при полигонизации во время отжига. При этом установлено значительно более сильное возрастание пределов упругости и текучести по сравнению с временным сопротивлением и твердостью.

Для этого случая модели формирования характеристик механических свойств будут иметь следующий вид:

$$\sigma_{в2}^{t} = \sigma_{в2}\{\sigma_{в0}, e_{i1}, t_{отж}, \tau_{отж}\};\ \delta_2^{t} = \delta_2\{\delta_0, e_{i1}, t_{отж}, \tau_{отж}\}; \tag{3.78}$$

или, в общем случае,

$$M_2^{t} = M_2\{M_0, e_{i1}, t_{отж}, \tau_{отж}\},$$

где M_2^{t}, M_0 – соответствующие символы любой из характеристик предельной прочности и пластичности $(\sigma_{0,2}, \sigma_{в}, \sigma_{iy}, \sigma_{ip}, S_k, \varepsilon_{iy}, \varepsilon_{ip}, \psi, \delta)$.

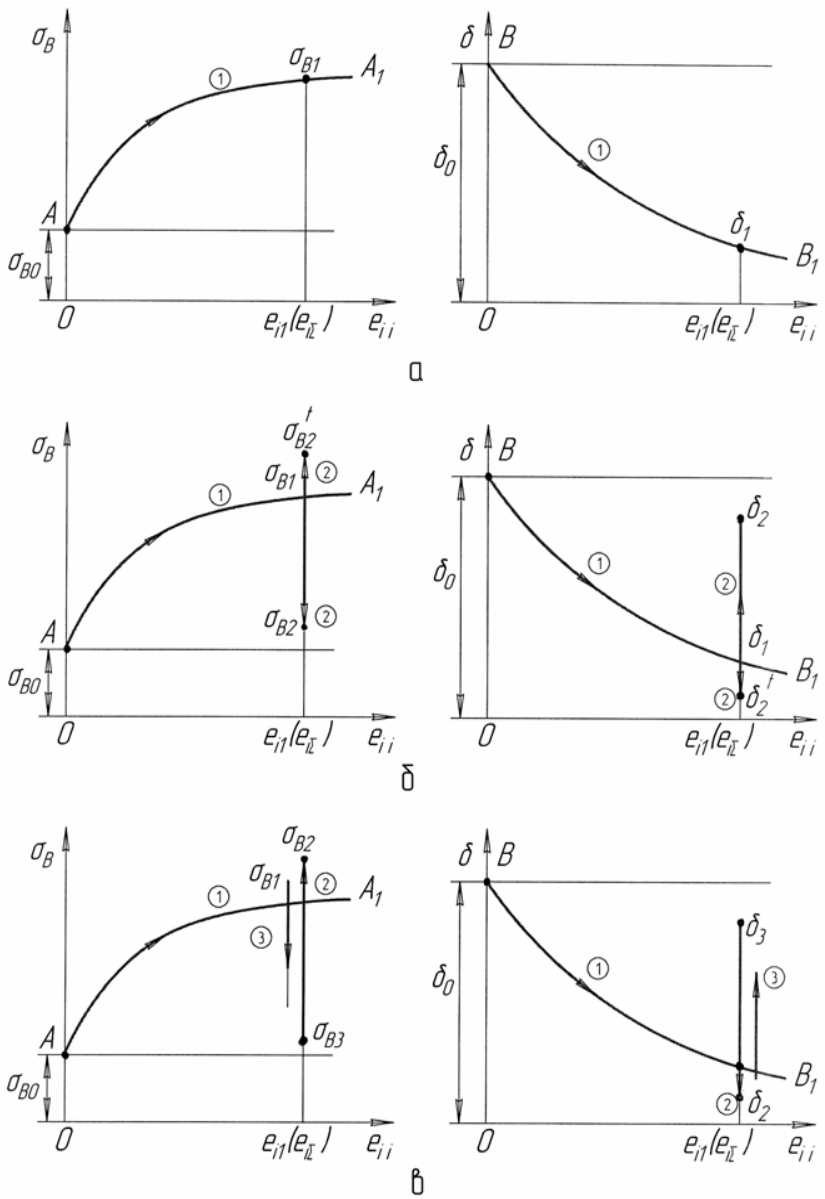


Рис. 3.8. Цикловые модели формирования характеристик предельной прочности $\sigma_в$ и пластичности

3. Формирующая операция – штамповка с последующей закалкой и отпуском (рис. 3.8, *в*). Технологические параметры: e_{i1} –

степень деформации; $t_{зак}$, $\tau_{зак}$ – температура нагрева и длительность выдержки при нагреве под закалку; $t_{отп}$, $\tau_{отп}$ – температура нагрева и длительность выдержки при нагреве под отпуск.

По сравнению с предыдущими случаями механизм процесса формирования свойств значительно сложнее, так как нагрев под закалку при высоких температурах будет сопровождаться не только полным завершением процесса рекристаллизации, но и возможной фазовой перекристаллизацией, а быстрое охлаждение, свойственное закалке, – эффектом изменения объема и связанным с ним фазовым наклепом, разориентировкой структуры и другими эффектами. Последующий отпуск, как правило высокий, снижает прочностные свойства, оставляя лишь незначительное упрочнение материала, вызванное структурными изменениями (рис. 3.8, *в*). Характеристики механических свойств рассчитываются по следующим моделям:

$$\begin{aligned} \sigma^t_{в3} &= \sigma^t{}_{в3}\{\sigma_{в0}, e_{i1}, t_{зак}, \tau_{зак}, t_{отп}, \tau_{отп}\}; \\ \delta^t_3 &= \delta^t_3\{\delta_0, e_{i1}, t_{зак}, \tau_{зак}, t_{отп}, \tau_{отп}\}; \\ M^t_3 &= M^t_3\{M_0, e_{i1}, t_{зак}, \tau_{зак}, t_{отп}, \tau_{отп}\}, \end{aligned} \qquad (3.79)$$

где M_3, M_0 – символы любой из характеристик предельной прочности и пластичности.

Модели (3.78), (3.79) относятся к цикловым многофакторным моделям.

При построении моделей формирования механических свойств при реализации процессов, состоящих из нескольких завершенных и незавершенных технологических циклов принимаем во внимание постулируемые положения о свойствах технологической наследственности (подразд. 3.1) и следующие допущения.

1. При реализации нескольких последовательно выполняемых незавершенных циклов обработки (при многопереходной штамповке одного вида без промежуточной термообработки) не учитывается влияние дробности деформации, в том числе эффект Баушингера, на интенсивность деформационного упрочнения. При этом несколько незавершенных циклов можно заменить на один незавершенный или завершенный (если после последнего перехода применяется термообработка), характеризуемый степенью накопленной эффективной деформации:

$$e_{i\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_п} e_{ii},$$

где e_{ii} – степень деформации на i-й операции (переходе); $N_п$ – количество операций (переходов).

2. На разупрочняющих технологических циклах, т.е. сопровождаемых разупрочняющей термической обработкой, интенсивность изменения характеристик механических свойств $d\sigma_в / de_i (dM / de_i)$ не зависит от степени деформации и режима обработки на предыдущем (i–1)-м цикле, от соотношения между цикловыми степенями деформации, а определяется степенью деформации на текущем i-м цикле в соответствии с диаграммой $\sigma_{вi} - e_i (M_i / e_i)$ материала в отожженном состоянии, т.е.

$$d\sigma_в / de_i = f(e_i);\ \ d\delta / de_i = f(e_{ii});\ dM / de_i = f(e_{ii}). \qquad (3.80)$$

3. На упрочняющих циклах обработки интенсивность деформационного упрочнения на штамповочных операциях определяется накопленной за все циклы эффективной степенью деформации в соответствии с диаграммой $\sigma_{вi} - e_i (M_i / e_i)$ для отожженного материала и не зависит от режима термообработки:

$$d\sigma_{вi} / de_{ii} = f(e_{i\Sigma});\ \ d\delta / de_i = f(e_{i\Sigma});\ dM / de_i = f(e_{i\Sigma}). \qquad (3.81)$$

4. Кривые упрочнения на различных циклах эквидистантны для одной и той же марки материала.

5. Распределение степеней деформации и механических свойств по толщине стенки в любом сечении однородно.

6. Материал до и после обработки изотропен.

На основании первого допущения сложный цикл может быть приведен к простому завершенному или незавершенному за счет того, что несколько операций (переходов) заменяются одной условной операцией (переходом), характеризуемой накопленной за эти операции (переходы) степенью деформации.

Пример построения графической схемы формирования механических свойств ($\sigma_в$, δ) на нескольких разупрочняющих циклах показан на рис. 3.9. Уровень исходных свойств материала в отожженном состоянии задан характеристиками $\sigma_{во}$, δ_0; уровень свойств после каждого i-го цикла – $\sigma_{вi}$, δ_i; уровень изменения свойств после каждого цикла по сравнению с исходным уровнем – $\Delta\sigma_{вi}$, $\Delta\delta_i$; уровень изменения свойств на каждом последующем условном цикле (показан пунктирной линией) по отношению к исходному уровню – $\Delta\sigma'_{вi}$, $\Delta\delta'_i$ (i = 1, 2, 3).

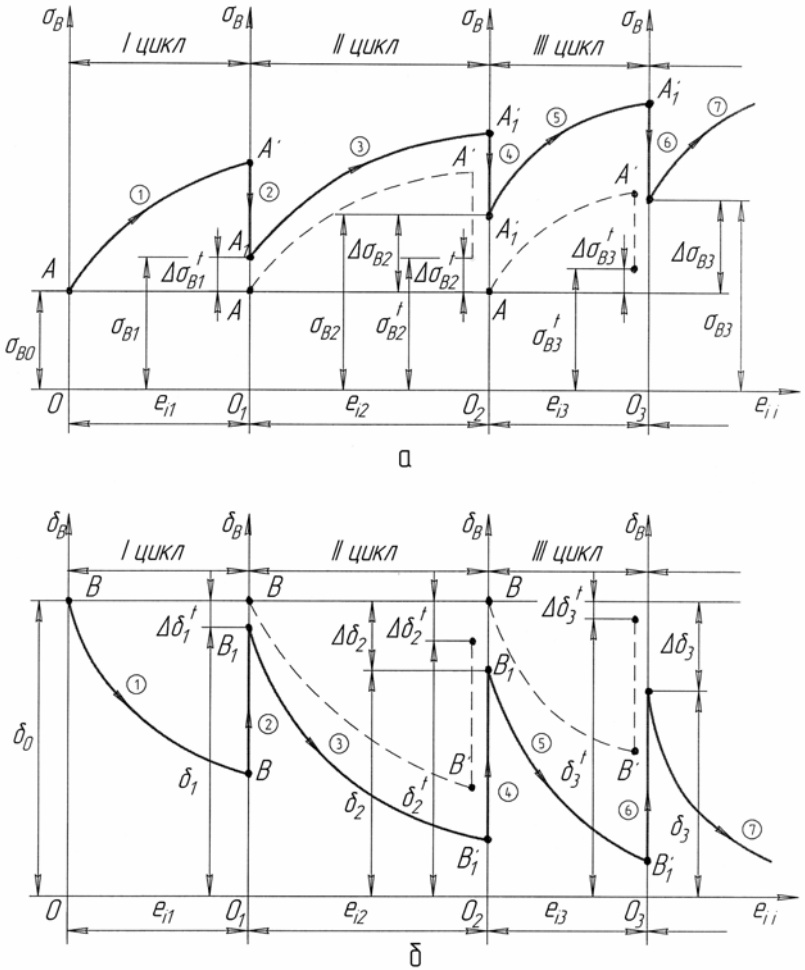


Рис. 3.9. Схемы формирования характеристик прочности (*а*) и пластичности (*б*) в технологических циклах с разупрочняющей термообработкой

В соответствии с этой схемой строятся модели характеристик $\sigma_в$ (рис. 3.9, *а*):

- при числе циклов 3

$$\sigma_{в1} = \sigma^t_{в1}; \quad \sigma_{в2} = \sigma^t_{в2} - \Delta\sigma^t_{в1},$$

$$\sigma_{в3} = \sigma^t_{в3} + \Delta\sigma_{в2} = \sigma^t_{в3} + (\Delta\sigma^t_{в1} + \Delta\sigma^t_{в2});$$

- при любом числе завершенных циклов $N_{з.ц}$

$$\sigma_{\text{в}n} = \sigma^t_{\text{в}n} + \Delta\sigma_{\text{в},n-1} = \sigma^t_{\text{в}n} + (\Delta\sigma^t_{\text{в}1} + \ldots + \sigma^t_{\text{в},n-1}) = \sigma^t_{\text{в}n} - \sum_{i=1}^{N_{\text{зц}-1}} \Delta\sigma^t_{\text{в}i},$$

где $\Delta\sigma^t_n = \sigma^t_{\text{в}1} - \sigma_{\text{в}0}$. Тогда

$$\sigma_{\text{в}n} = \sigma^t_{\text{в}n} + \sum_{i=1}^{N_{\text{ц}-1}} \left(\sigma^t_{\text{в}i} - \sigma_{\text{в}0}\right) = \sigma^t_{\text{в}n} + \sum_{i=1}^{N_{\text{ц-1}}} \sigma^t_{\text{в}n} - \sum_{i=1}^{N_{\text{ц-1}}} \sigma_{\text{в}0},$$

$$\sigma_{\text{в}n} = \sum_{i=1}^{N_{\text{ц}}} \sigma^t_{\text{в}i} - (N_{\text{ц}} - 1)\sigma_{\text{в}0}, \qquad (3.82)$$

где $\sigma^t_{\text{в}i} = \sigma^t_{\text{в}i}(\sigma_{\text{в}0}, e_{ii}, t_i, \tau_i)$ – цикловая многофакторная модель (3.78), (3.79); $\sigma^t_{\text{в}i}$ – функция отклика.

Модель (3.82) относится к сложным многоцикловым многофакторным моделям.

Аналогично запишем для характеристики δ (и любой другой характеристики пластичности, рис. 3.9, *б*):

- для трех циклов

$$\delta_1 = \delta^t_1; \quad \delta_2 = \delta^t_2 - \Delta\delta^t_1,$$

$$\delta_3 = \delta^t_3 - \Delta\delta_2 = \delta^t_3 - (\Delta\delta^t_1 + \Delta\delta^t_2);$$

- для $N_{\text{ц}}$

$$\delta_n = \delta^t_n - \Delta\delta_{n-1} = \delta^t_n - (\Delta\delta^t_i + \ldots + \delta^t_{n-1}) = \delta^t_n - \sum_{i=1}^{N_{\text{ц}-1}} \Delta\delta^t_i,$$

где $\Delta\delta^t_i = \delta_0 - \delta^t_i$.

С учетом приведенных равенств получим

$$\delta_n = \sum_{i=1}^{N_{\text{ц}}} \delta^t_i - (N_{\text{ц}} - 1)\delta_0, \qquad (3.83)$$

где $\delta^t_i = \delta^t_i(\delta_0, l_{ii}, t_i, \tau_i)$ – цикловая многофакторная модель (3.78), (3.79); δ^t_i – функция отклика.

Полученные модели можно распространить на любые характеристики прочности и пластичности:

$$M_n = \sum_{i=1}^{N_{\text{ц}}} M^t_i - (N_{\text{ц}} - 1)M_0, \qquad (3.84)$$

где $M_i^t = M_i^t(M_0, l_{i\Sigma}, t_i, \tau_i)$ – цикловая многофакторная модель характеристики M_i (3.78), (3.79); M_i^t – функция отклика регрессионной модели характеристики M_i.

На рис. 3.10 показана схема формирования механических свойств материала детали, реализуемая за два полных (завершенных) цикла обработки заготовки, каждый из которых в свою очередь состоит из определенного числа незавершенных циклов (многопереходной штамповки без промежуточных отжигов) и заключительной разупрочняющей термообработки. В границах первого цикла выделено шесть, а в границах второго – три незавершенных цикла (штамповочных переходов), определены значения степеней деформации по переходам $(e_{i1}^j, e_{i2}^j, \ldots, e_{i9}^j)$ и накапливаемые в пределах каждого из циклов деформации $(e_{i1}^j, e_{i3\Sigma}^j, \ldots, e_{i6\Sigma}^j, \ldots, e_{i\text{д}\Sigma}^j)$, влияющие на деформационное упрочнение металла детали. Соответственно показан характер изменения характеристик прочности и пластичности от исходного уровня $\sigma_{\text{в}0}, \delta_0$ до уровня свойств готовой детали $\sigma_{\text{в}n}, \delta_n$.

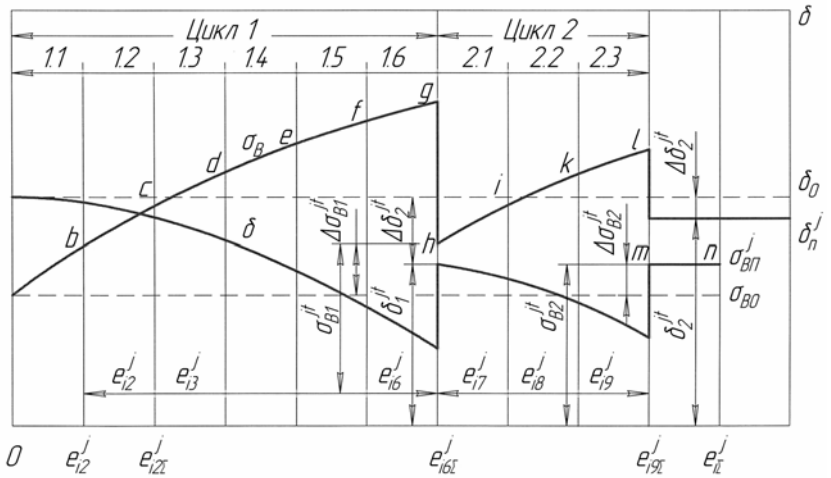


Рис. 3.10. Схема формирования характеристик механических свойств металла изделия за два полных многопереходных цикла

Пример схемы формирования механических свойств при реализации нескольких последовательно выполняемых упрочняющих циклов показан на рис. 3.11.

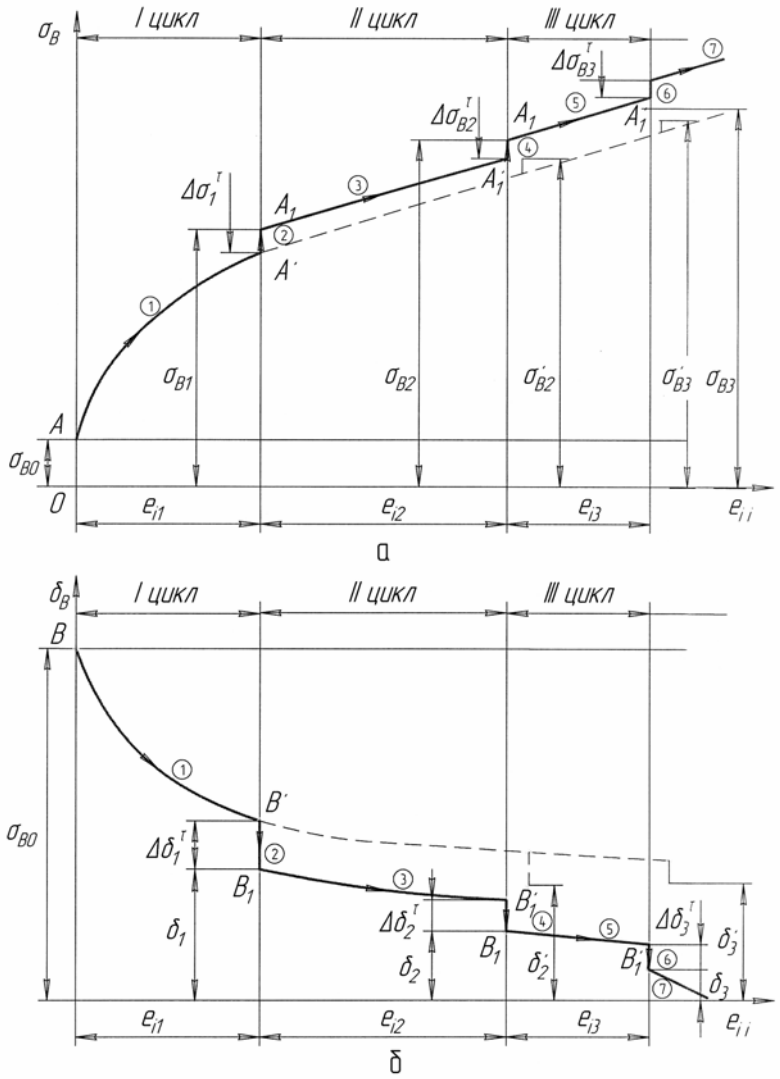


Рис. 3.11. Схемы формирования характеристик прочности (*а*) и пластичности (*б*) за *n* – циклов упрочняющей обработки

Такая схема, с применением, например, промежуточных упрочняющих дорекристаллизационных низкотемпературных отжигов, встречается на финишных операциях изготовления деталей. В общем случае низкотемпературный отжиг (НТО) этого вида снимает остаточные напряжения и делает структуру металла бо-

лее устойчивой, равновесной, несколько повышая прочностные свойства детали. Применив несколько таких циклов обработки, можно повысить прочностные свойства материала до заданных техническими условиями значений.

Графическая схема прогнозирования свойств металла на циклах с упрочняющей термообработкой строится иначе, чем на циклах с разупрочняющими видами термообработки. Деформационное упрочнение после такой обработки рассчитывается по накопленной за все циклы суммарной степени деформации. Поэтому кривые упрочнения A_1A_1' и B_1B_1' (см. рис. 3.11), определяющие величину деформационного упрочнения на каждом цикле, эквидистантны соответствующим участкам единой кривой упрочнения AA', построенной для отожженного материала в системе координат $\sigma_{\text{в}} - e_i(\delta - e_i)$.

Из схемы, представленной на рис. 3.11, *а*, следует:

$\sigma_{\text{в}1} = \sigma^t_{\text{в}1}$ – для 1-го цикла;

$\sigma_{\text{в}2} = \sigma^t_{\text{в}2} + \Delta\sigma^t_{\text{в}1}$ – для 2-го цикла;

$\sigma_{\text{в}3} = \sigma^t_{\text{в}3} + \Delta\sigma^t_{\text{в}1} + \Delta\sigma^t_{\text{в}2}$ – для 3-го цикла;

$\sigma_{\text{в}n} = \sigma^t_{\text{в}n} + \sum\limits_{i=1}^{N_{\text{ц}-1}} \Delta\sigma^t_{\text{в}i}$ – для $N_{\text{ц}}$-цикла,

где $\Delta\sigma^t_{\text{в}i} = \sigma^t_{\text{в}i} - \sigma^{\text{д}}_{\text{в}i}$; $\sigma^t_{\text{в}i} = \sigma^t_{\text{в}i}(e_{i\Sigma}, t_i, \tau_i)$ – многофакторная модель (3.78), (3.79); $\sigma^{\text{д}}_{\text{в}i} = \sigma^{\text{д}}_{\text{в}i}(e_{i\Sigma})$ – однофакторная модель (3.77).

На основе приведенных равенств получим

$$\sigma_{\text{в}n} = \sum_{i=1}^{N_{\text{ц}}} \sigma^t_{\text{в}i} - \sum_{i=1}^{N_{\text{ц}-1}} \sigma^{\text{д}}_{\text{в}i},$$

(3.85)

Применяя аналогичный метод построения модели характеристики пластичности по рис. 3.11, *б*, запишем:

$$\delta_n = \sum_{i=1}^{N_{\text{ц}}} \delta^t_i - \sum_{i=1}^{N_{\text{ц}-1}} \delta^{\text{д}}_i,$$

(3.86)

$\delta^t_i = \delta^t_i(e_{i\Sigma}, t_i, \tau_i)$ – многофакторная модель (3.78), (3.79); $\delta^{\text{д}}_i = \delta^{\text{д}}_i(e_{i\Sigma})$ – однофакторная модель (3.77).

В соответствии с (3.85) и (3.86) можно представить для любой из характеристик механических свойств M, формируемой при реализации упрочняющих циклов обработки, модель в виде соотношения

$$M_n = \sum_{i=1}^{N_{\text{ц}}} M_i^t - \sum_{i=1}^{N_{\text{ц}-1}} M_i^{\text{д}},$$

(3.87)

где $M_i^t = M_i^t(e_{i\Sigma}, t_i, \tau_i)$ – многофакторная цикловая модель, $M_i^{\text{д}} = M_i^{\text{д}}(e_{i\Sigma})$ – однофакторная цикловая модель характеристики M.

С использованием аналогичного метода построена модель формирования механических свойств при реализации в технологическом процессе смешанных циклов обработки (упрочняющих и разупрочняющих – рис. 3.12) в виде соотношения

$$M_n = \sum_{i=1}^{N} M_i^t - (N_{\text{р}} - 1)M_0 - \sum_{i=1}^{N_y} M_i^{\text{д}}, \qquad (3.88)$$

где $N = N_{\text{р}} + N_{\text{у}}$ – общее количество циклов обработки; $N_{\text{р}}$, $N_{\text{у}}$ – количество разупрочняющих и упрочняющих циклов обработки соответственно.

В принципе, используя понятие об эффективной степени деформации (п. 3.2) и основные соотношения для ее определения (3.18)...(3.22), можно вместо сложных многофакторных моделей (3.84), (3.87), (3.88) использовать простые однофакторные вида (3.77):

$$M_n = M_n(M_0, (e_{i\text{эф}})_\Sigma),$$

(3.89)

где $(e_{i\text{эф}})_\Sigma$ – накопленная за N циклов эффективная деформация.

Однако в этом случае необходимо построить модели (3.24). Расчеты по предлагаемым выше формулам дают средние (номинальные) значения прогнозируемых характеристик механических свойств. В действительности эти характеристики имеют разброс значений ввиду действия на них большого числа контролируемых и неконтролируемых факторов производства. Этот разброс определяется на основании статистического анализа механических характеристик деталей, изготавливаемых с применением рассмотренных схем обработки и соответствующих типовых процессов. Истинные значения любой из характеристик механических

свойств обрабатываемой заготовки (детали) на любом i-м цикле технологического процесса определяются как

$$[M_i] = M_i \pm \Omega_i / 2, \qquad (3.90)$$

где $[M_i]$ – значение характеристики с учетом ее разброса; Ω_i – поле рассеяния механических характеристик металла заготовки на i-м цикле технологического процесса, определяемое статистическим путем.

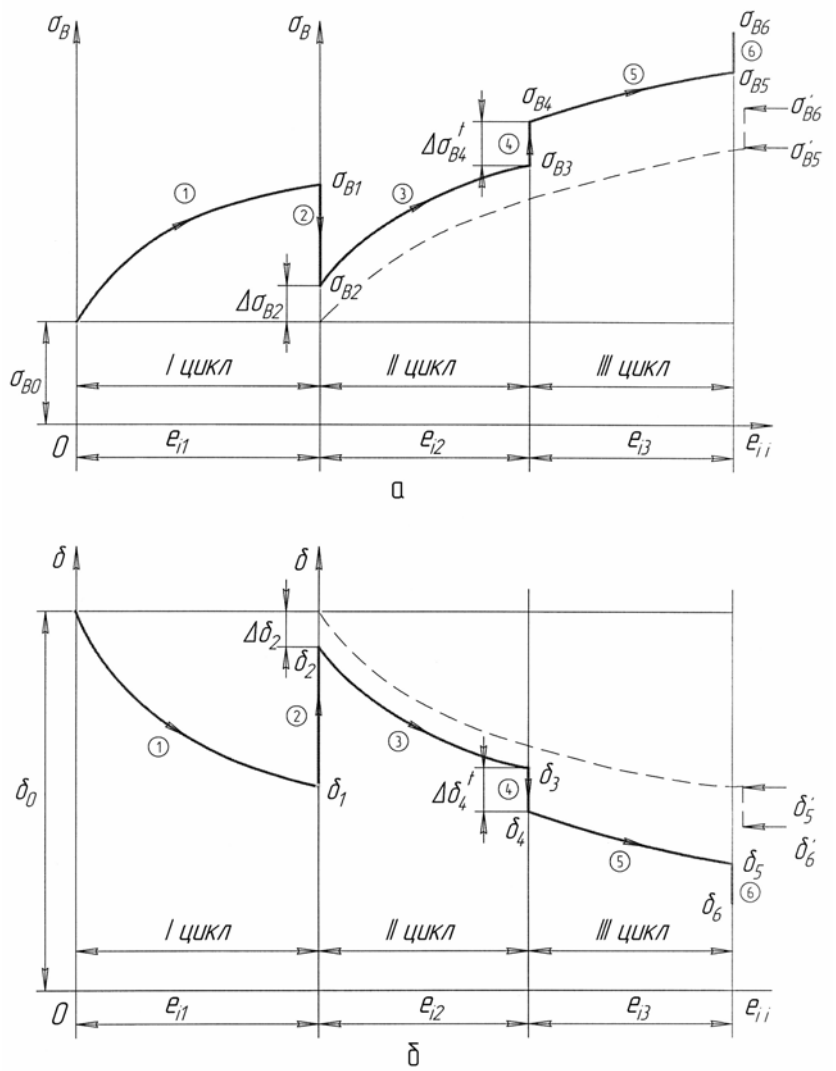


Рис. 3.12. Схемы формирования характеристик прочности (*а*) и пластичности (*б*) при реализации в технологии смешанных циклов обработки

На основании исследований авторами установлено, что характеристики механических свойств штампуемых деталей не противоречат гипотезе нормального распределения, т. е. при вероятности $P \approx 0{,}997$

$$\Omega_i = 6V_i M_i, \tag{3.91}$$

где $V_i = S_{M_i} / M_i$ – коэффициент вариации; S_{M_i} – среднее квадратичное отклонение характеристики M_i.

После подстановки (3.91) в (3.90) получим (при вероятности $P \approx 0{,}997$)

$$\left[M_i\right] = M_i\left(1 \pm 3V_{M_i}\right). \tag{3.92}$$

Контрольные вопросы

1. Какие основные формы технологического движения определяют изменение физико-механического состояния обрабатываемой металлической заготовки?
2. В каком виде записывается условие изменения энергетического состояния металла заготовки, обрабатываемой с применением комплексного технологического процесса?
3. Какие предельные состояния характеризуют поведение металла при пластической деформации?
4. Какие характеристики механических свойств отвечают предельным состояниям металла изготавливаемой детали?
5. В чем заключается технологическая наследственность металла?
6. Что понимается под эффективной степенью деформации?
7. Как определяется накопленная степень деформации?
8. От чего зависит эффективная степень деформации?
9. В чем состоит эффект Баушингера при пластической деформации металла?
10. Составьте уравнение баланса ресурса пластичности метала изделия, изготавливаемого с применением комплексного технологического процесса.
11. Как влияет показатель жесткости схемы напряженного состояния *K* на коэффициент использования ресурса пластичности штампуемого материала?
12. Какие модели формирования механических свойств металла относятся к простым?
13. Какие модели формирования механических свойств относятся к сложным?
14. Какие основные допущения принимают для построения моделей формирования характеристик механических свойств металла изделий?

Библиографический список

1. *Лясников А.В.*, Агеев Н.П., Кузнецов Д.П. и др. Сопротивление материалов пластическому деформированию в приложениях к процессам обработки металлов давлением / Под ред. А.В. Лясникова. СПб.: Внешторгиздат-Петербург, 1995. 527 с.

2. *Иванов К.М.*, Лясников А.В. и др. Математическое моделирование процессов обработки давлением: Учебное пособие / Под ред. А.В. Лясникова. СПб: «ИНВЕНТЕКС», 1997. 268 с.

3. *Смирнов-Аляев Г.А.* Сопротивление материалов пластическому деформированию. Л.: Машиностроение, 1978. 368 с.

4. *Агеев Н.П.*, Данилин Г.А., Огородников В.П. Вытяжка в штампах полых тонкостенных деталей машино- и приборостроения. Ч. 1. Механические основы процесса. Тверь: Герс, 1997. 336 с.

5. *Богатов А.А.*, Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1984. 143 с.

6. *Дель Г.Д.* Технологическая механика. Библиотека расчетчика. М.: Машиностроение, 1978. 174 с.

7. *Теория* ковки и штамповки / Под общ. ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова. М.: Машиностроение, 1992. 720 с.

8. *Агеев Н.П.*, Спинул Г.П. Применение статистических методов для обработки результатов эксперимента и оценки точности технологических процессов: Учебное пособие. Л.: ЛМИ, 1982. 78 с.

4. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАТРОНОВ

4.1. Основные понятия и определения

Технологичность конструкции изделия (ТКИ), согласно принятой в научно-технической литературе и стандартах (ЕСТПП) терминологии, есть совокупность свойств этой конструкции, определяющая пригодность изделия для производства, эксплуатации и ремонта с оптимальными затратами всех видов ресурсов при обязательном обеспечении всех заданных эксплуатационных свойств.

Состав основных эксплуатационных свойств (показателей качества) патронов рассмотрен в разд. 2.

По области проявления технологичность конструкции изделий разделяют на производственную, эксплуатационную и ремонтную. Производственная ТКИ характеризует пригодность конструкции к сокращению ресурсов и времени на техническую подго-

товку 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 (рис. 4.1).

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

Изделие, являясь объектом проектирования, проходит ряд стадий (рис. 4.2):

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;

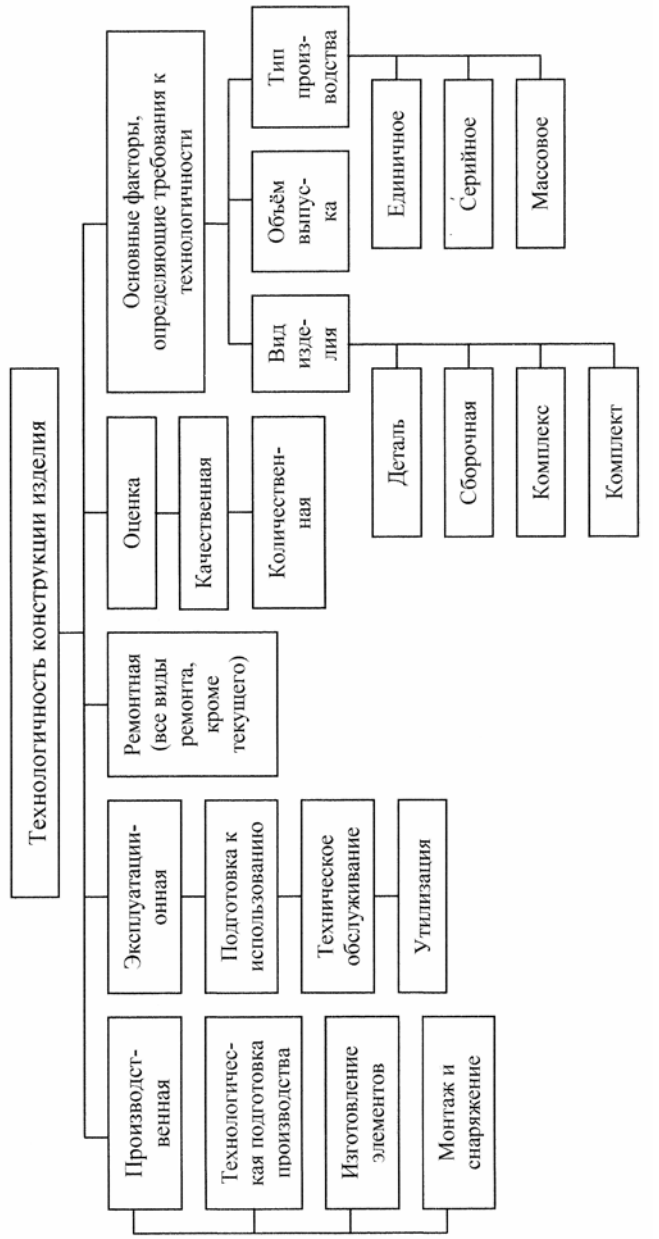


Рис. 4.1. Общая классификация технологичности конструкции изделия

10 – разработка технологической документации на серию;

11 – разработка и изготовление технологической оснастки на серию;

12 – изготовление установочной партии, начало серийного производства.

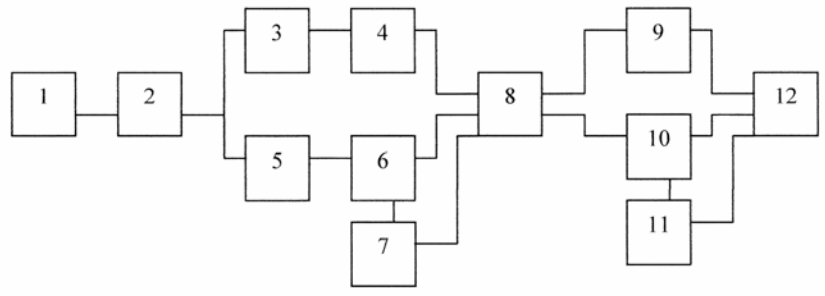


Рис. 4.2. Основные стадии разработки конструкции нового изделия

При этом под опытным образцом (макетом) понимается изделие, воспроизводящее его составные части в масштабе и объеме, необходимых для проверки принципов их работы при выполнении проектной или рабочей документации. Образец в условиях единичного производства представляет собой 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 которых должна быть разработана конструкторская документация. Проектная конструкторская документация (КД) – 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 проектной КД разрабатывают предварительный проект тех-

нологической 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. 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.

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 установлен 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. 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 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 (понятие технологического подобия подробно рассматривается ниже). Из практики известно, что технологии обновляются в более длительные сроки, чем сами изделия, поэтому 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 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) становится одним из главных принципов наиболее целесообразной тех-

нологической 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 были получены ранее при выполнении научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических разработок, освоены в производстве 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, т.е. создается групповой технологический процесс, значительно расширяющий возможности существующего, обеспечивающий рациональную обработку деталей различного назначения при родственных 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:

$$\{C_a\} \equiv \{C_b\} = \text{idem}, \qquad (4.1)$$

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

В реальном проектировании и производстве не наблюдается абсолютного тождества свойств объектов и можно лишь говорить о приближенном 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:

$$\left|C_{\text{от}}\right| = \bigcap_{i=1}^{n} C_{\text{от}i}, \ \left(i = 1,2, ..., n\right) \to \max. \qquad (4.2)$$

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:

$$K_{\text{пр}}^{\text{с}} = \frac{E_{\text{пр}} + D_{\text{пр1}}}{E + D}, \qquad (4.3)$$

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 $N^{\text{кэ}}$, т.е.

$$K_{\text{пр}}^{D} = N_{\text{пр}}^{\text{кэ}} \big/ N^{\text{кэ}}. \qquad (4.4)$$

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

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

4.2. 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 боль-

шую 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 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);

2) сравнение значений определяющих конструктивно-технологических параметров (КТП) разрабатываемого изделия с допустимыми значениями, устанавливаемыми из анализа технологических возможностей предполагаемых для применения в технологическом процессе 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 с общими конструктивными признаками и регламентируются нормативными документами. Оптимальные значения показателей технологичности базовой конструкции изделия указываются в техническом задании на его разработку. Показатели уровня ТКИ определяются как отношение значений показателей технологичности разрабатываемого изделия

к соответствующим показателям базового представителя. Выбор базовых значений ТКИ, относительно которых определяется уровень технологичности и организуется весь процесс отработки конструкции изделия на технологичность, является начальным этапом.

В соответствии с государственными стандартами ЕСТПП выделяют следующие показатели технологичности:

- по области анализа – технические и технико-экономические;
- по системе оценки – базовые и разрабатываемой конструкции;
- по значимости – основные и дополнительные;
- по количеству характеризуемых признаков – единичные (частные), групповые и комплексные;
- по способу выражения – абсолютные и относительные.

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

$$K_{\text{ут}} = T_{\text{и}} / T_{\text{б}}; \quad K_{\text{ус}} = C_{\text{ти}} / C_{\text{тб}}, \tag{4.5}$$

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

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 технологическая себестоимость изготовления по видам работ $C_{\text{т}i} / C_{\text{ти}}$;
- удельная технологическая себестоимость изготовления изделия $C_{\text{ти}} / P_j$.

Здесь $T_i, C_{\text{т}i}$ – трудоемкость и технологическая себестоимость по видам работ; P_j – технологический параметр изделия *j*-вида (например, масса, объем, мощность и др.).

Недостатки первого метода оценки ТКИ:

• неидентичность конструкции разрабатываемого изделия и базового представителя при разработке принципиально новых конструкций;

• 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 различных, особенно ранних стадиях конструирования изделия и технологического проектирования, ввиду отсутствия или недостаточности необходимой информации.

Второй и третий (предлагаемый авторами) методы 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, в совокупности влияющим на трудоемкость и себестоимость изготовления. Эти показатели сопоставляются с их допустимыми значениями, устанавливаемыми на основе анализа технологических возможностей планируемых для применения способов обработки.

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

Для этого воспользуемся формулой приближенной оценки технологической себестоимости на основе нормативов затрат, приходящихся на один час работы оборудования:

$$C_{\text{т}} = C_{\text{м}} + \sum_{i=1}^{n}\left(З_{\text{р}i} + \frac{t_{\text{мт}i}}{K_{\text{в}i}} C_{\text{о}i} \right), \qquad (4.6)$$

где n – число операций технологического процесса; $З_{\text{р}i}$ – заработная плата с доплатами и отчислениями в соцстрах на i-й операции; $t_{\text{мт}i}$ – норма машинного времени; $K_{\text{в}i}$ – коэффициент выполнения норм времени; $C_{\text{о}i}$ – расходы, связанные с работой оборудования, включающие стоимость электроэнергии, вспомога-

тельных материалов, затраты на амортизацию и ремонт, расходы по эксплуатации технологической оснастки; $C_{\text{м}}$ – затраты на основные материалы.

Затраты на основные материалы определяются по известному уравнению

$$C_{\text{м}} = M_{\text{о}} Ц_{\text{м}} K_{\text{т}} - M_{\text{отх}} \cdot Ц_{\text{отх}}, \tag{4.7}$$

где $M_{\text{о}}, M_{\text{отх}}$ – масса исходной заготовки (норма расхода материала) и отходов, $K_{\text{т}}$ – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы на приобретение материала, $Ц_{\text{м}}, Ц_{\text{отх}}$ – оптовая цена на материал и цена отхода материала.

Из формулы (4.7) после подстановки значения $M_{\text{отх}} = M_{\text{о}} - M_{\text{д}}$ и элементарных преобразований следует:

$$C_{\text{м}} = \frac{M_{\text{д}}}{\eta}\left[(1{,}05...1{,}10)Ц_{\text{м}} - \frac{(1-\eta)}{\eta}Ц_{\text{отх}}\right], \tag{4.8}$$

где $\eta = M_{\text{д}} / M_{\text{о}}$ – коэффициент использования материала в целом по технологическому процессу.

Таким образом, материалоемкость продукции и затраты на материал характеризуются двумя основными техническими показателями: массой детали $M_{\text{д}}$ и коэффициентом использования металла η. При этом масса $M_{\text{д}}$ рассчитывается по чертежу детали, а коэффициент назначается по справочным данным с учетом принятых типа технологического процесса и формы исходной заготовки.

Затраты на заработную плату на отдельной операции определяются из соотношения

$$З_{\text{р}i} = C_{\text{ч}i} K_{\text{о}i} t_{\text{мт}i} \beta_i (1 + A_i), \tag{4.9а}$$

где $C_{\text{ч}i}$ – часовая тарифная заработная плата основных рабочих при выполнении i-й операции, руб./чел.·ч; $K_{\text{о}i}$ – коэффициент, учитывающий приработок рабочих, отчисления в фонд социального страхования, премии и другие оплаты; β_i – коэффициент, учитывающий влияние на трудоемкость операции бригадной или многостаночной работы; A_i – коэффициент, учитывающий затраты на заработную плату вспомогательным рабочим и инженерно-

техническим работникам (ИТР). Произведение $\beta_i t_{\text{м}ti}$ выражает норму трудоемкости операции в человеко-часах. Часовая тарифная ставка $C_{\text{ч}i}$ назначается по действующей на предприятии тарифной сетке в зависимости от сложности выполняемых работ и требуемой квалификации рабочих.

Повышение сложности работ на один разряд увеличивает производственную зарплату на 10…15%. Следовательно, разряд работ определяется степенью геометрической сложности конструкции детали, зависящей от количества и формы конструктивных элементов и поверхностей $N_{\text{э}}$, допускаемых отклонений на размеры, допустимой шероховатости поверхностей, количества унифицированных $N_{\text{у}}$, стандартизованных $N_{\text{ст}}$ и повторного применения $N_{\text{пт}}$ конструктивных элементов и поверхностей.

Для оценки степени геометрической сложности конструкции целесообразно ввести следующие показатели технологичности: количество конструктивных элементов детали $N_{\text{э}}$; степень их унификации и стандартизации: $K_{\text{у}} = \dfrac{N_{\text{у}} + N_{\text{ст}} + N_{\text{пт}}}{N_{\text{э}}}$; допустимые отклонения на размеры (класс точности, квалитеты точности); допускаемую шероховатость поверхностей R_a, R_z.

Применительно к машиностроению норма штучного времени определяется выражением

$$t_{\text{шт}i} = \frac{1}{m_i}\left(t_{\text{о}i} + t_{\text{в}i}\right)K_i = \frac{1}{m_i}\left(\frac{L_i n_{\text{пр}}}{v_i} + t_{\text{в}i}\right)K_i, \qquad (4.9\text{б})$$

где $t_{\text{о}i}, t_{\text{в}i}$ – основное (машинное) и вспомогательное время (например, при штамповке вспомогательное время затрачивается на взятие заготовки и подачи ее к прессу, установку заготовки в штамп, удаление готовой детали и отходов и др.); K_i – коэффициент, учитывающий время на обслуживание рабочего места, отдых и естественные надобности; m_i – количество одновременно изготавливаемых в штампе (приспособлении) деталей; L_i – расчетная высота (длина) обработки; $n_{\text{пр}}$ – число проходов инструмента; ν_i – средняя скорость движения рабочего инструмента.

При этом расчетная длина обработки определяется в зависимости от высоты (длины) H_i обрабатываемой детали, а скорость движения рабочего инструмента, например скорость деформирования ν_i, во многих случаях зависит от механических свойств обрабатываемого материала, сопротивления, деформирования $(\sigma_{0,2}, \sigma_{\text{т}}, \sigma_{\text{в}}, \sigma_i)$ и пластичности $(\varepsilon_{i\text{у}}, \varepsilon_{i\text{р}}, \psi)$. С увеличением полной высоты (длины) готовой детали и высот отдельных конструктивных элементов h_i, а также сопротивления материала заготовки деформированию машинное время $t_{\text{о}i}$ увеличивается и возрастают расходы на заработную плату. Отсюда становится очевидным необходимость применения в качестве показателей технологичности полной высоты (длины) H_i обрабатываемой детали и показателей сопротивления деформированию ($\sigma_{0,2}, \sigma_{\text{в}}$) материала исходной заготовки. При создании новых производств большое значение придается механизации технологических процессов, обеспечивающей значительное повышение производительности за счет сокращения или полного исключения вспомогательного времени (например, при применении автоматических роторных линий) и связанных с этим затрат. Поэтому представляется целесообразным введение показателя технологичности, характеризующего степень пригодности конструкции изделия к механизации и автоматизации.

За основу способа оценки можно принять принцип поэлементного анализа конструкции изделия, деталей, сборочных компонентов, материалов с точки зрения возможности и целесообразности автоматического выполнения следующих операций: ориентации деталей в пространстве и времени, подачи их в рабочие органы, базирования (установки) в рабочей позиции, съема, послеоперационного транспортирования. Параметрами оценки являются конфигурация, физико-механические свойства сечения и поверхности, сцепляемость, габаритные размеры (H, D) и их соотношения, показатели симметрии и др. В зависимости от указанных параметров определяется категория сложности механизации и автоматизации.

Из анализа структуры затрат на эксплуатацию оборудования $C_{\text{о}i}$ следует, что основными статьями являются затраты на энергию $C_{\text{э}i}$, амортизацию $C_{\text{а}i}$, ремонт и обслуживание $C_{\text{р}i}$, а также

на вспомогательные материалы $C_{\text{в}i}$, т.е. $C_{\text{о}i} = C_{\text{э}i} + C_{\text{а}i} + C_{\text{р}i} + C_{\text{в}i}$. Затраты на электроэнергию зависят от суммарной установленной мощности электродвигателей оборудования $N_{\text{у}i}$, а она – от работы A_i, затрачиваемой на изменение состояния любого обрабатываемого конструктивного элемента (или нескольких совместно обрабатываемых элементов) детали, т.е.

$$N_{\text{у}i} = \frac{A_i}{\eta_{\text{ц}i} t_{zi}};\ A_i = \int_0^{hi} P_i dh_i = A_{\text{ид}i} + A_{\text{тр}i} = \frac{A_{\text{ид}i}}{\eta_i};$$

$$A_{\text{ид}i} = A_{\text{уд}i} \nu_i; \quad A_{уді} = \int_0^{\varepsilon_i} \sigma_i d\varepsilon_i,$$

где $A_{\text{ид}i}$ – идеальная работа формоизменения (без учета потерь на трение) при формообразовании определенного конструктивного элемента детали на i-й технологической операции; ν_i – объем пластически деформируемого конструктивного элемента; $A_{\text{уд}i}$ – удельная работа формоизменения, рассчитываемая по кривым упрочнения $\sigma_i - \varepsilon_i$; σ_i, ε_i – интенсивности напряжений и деформаций; $A_{\text{тр}i}$ – работа сил трения на i-й технологической операции; $\eta_{\text{ц}i}, t_{\text{ц}i}$ – КПД механизма и время цикла; η_i – КПД процесса пластической деформации.

Как известно из теории пластичности, интенсивность напряженного состояния σ_i зависит от исходного уровня сопротивления материала заготовки деформированию $(\sigma_{0,2}, \sigma_{\text{в}})$, интенсивности деформации (степени деформации, необходимой для формирования определенного конструктивного элемента и его свойств) и способности материала к деформационному упрочнению $(E_{\text{к}i} = d\sigma_i / d\varepsilon_i, n)$. Интенсивность деформации ε_i определяется соотношением размеров обрабатываемого конструктивного элемента детали, устанавливаемых в зависимости от вида выполняемой штамповочной операции;

$$\sigma_i = f_1(\sigma_{0,2}, \sigma_i, n);\ \varepsilon_i = f_2(h_i/d_i);\ \varepsilon_i = f_3\left(d_i^j / d_i^{j+1}\right);\ \varepsilon_i = f_4\left(S_i^{j+1} / S_i^j\right),$$

где h_i/d_i – относительная высота; d_i / d_i^{j+1} – перепад диаметров; S_i^{j+1} / S_i^j – перепад толщин.

На основании изложенного для характеристики энергозатрат могут быть приняты показатели механических свойств $\left(\sigma_{0,2}, \sigma_{\text{в}}, \sigma_{i\text{у}}, E_{\text{к}i}, n\right)$, а также габаритные размеры (H, D) и относительные размеры конструктивных элементов детали (h_i/d_i, d_i^j/d_i^{j+1}, S_i^{j+1}/S_i^j и др). Затраты на амортизацию ($C_{\text{а}i}$) и ремонт ($C_{\text{р}i}$) пропорциональны балансовой стоимости оборудования, а последняя зависит, в свою очередь, от таких параметров детали, как габаритные размеры (H, D, S), масса $M_{\text{д}}$, механические свойства обрабатываемого материала ($\sigma_{0,2}, \sigma_{\text{в}}$ и др.). Затраты по содержанию технологической оснастки складываются из затрат по штампам и приспособлениям, рабочему и мерительному инструментам. При этом стоимость оснастки и инструмента, по существу, зависит от тех же параметров изготовляемой детали, что и затраты на оборудование. Основными параметрами, определяющими контролепригодность изделия, могут служить масса детали $M_{\text{д}}$, ее габаритные размеры (H, D), размеры отдельных конструктивных элементов $\left(h_i, d_i, S_i\right)$, количество и вид контролируемых параметров, допускаемые отклонения на них. Как следует из формулы (4.6), полная технологическая себестоимость определяется суммой затрат на всех технологических операциях, а общее количество операций будет равно:

$$n = \sum_{z=1}^{N_{\text{э}}-N_{\text{с}}} \left[\left(n_z\right)_{\text{осн}} + \left(n_z\right)_{\text{под}}\right]; \ \left(n_z\right)_{\text{осн}} = n_{z\text{ф}} + n_{z\text{т}} + n_{z\text{х}};$$

$$\left(n_z\right)_{\text{под}} = n_{n\text{т}} + n_{n\text{х}}; \quad n_{z\text{ф}} = n_{\text{шт}} + n_{\text{мех}}, \qquad (4.10)$$

где $\left(n_z\right)_{\text{осн}}, \left(n_z\right)_{\text{под}}$ – количество основных и подготовительных технологических операций; $\left(n_{z\text{ф}}, n_{z\text{т}}, n_{z\text{х}}\right)$ – количество основных формоизменяющих, термических и химических операций; $n_{n\text{т}}, n_{n\text{х}}$ – количество подготовительных термических и химических операций; $n_{\text{шт}}, n_{\text{мех}}$ – количество штамповочных операций и операций по обработке резанием; $N_{\text{с}}$ – количество совместно обрабатываемых элементов на данной технологической операции.

Количество формоизменяющих штамповочных операций устанавливается в зависимости от требуемой накопленной (суммарной) степени деформации $e_{i\Sigma}^z$, необходимой для получения опре-

деленных размеров обрабатываемого конструктивного элемента z и допустимой степени деформации $[e_i]$:

$$n_{\text{шт}} = f_1\left(e_{i\Sigma}^z, [e_i]\right); \;\; e_{i\Sigma}^z = f_2\left(\frac{P_n^z}{P_0^z}\right),$$

где $P_0^z, P_{\text{п}}^z$ – размеры z-го конструктивного элемента детали до и после обработки.

Количество основных термических операций зависит от заданных физико-механических свойств z-го конструктивного элемента детали M_z и их отношения к свойствам металла M_0 до обработки, т.е. $n_{z\text{Т}} = f\left(M_z, \dfrac{M_z}{M_0}\right)$.

На основании изложенного выделены следующие группы единичных (частных) технических показателей ТКИ:

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

2) обрабатываемость материалов $\sigma_{0,2}, \sigma_{\text{в}}, \sigma_{0,2}/\sigma_{\text{в}}, n, \varepsilon_{i\text{р}}, HV$ 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 $\dfrac{N_{\text{сб}} + N_{\text{сб}}^{\text{ст}} + N_{\text{сб}}^{\text{пт}}}{N_{\text{сби}}}$, деталей $\dfrac{N_{\text{д}}^{\text{у}} + N_{\text{д}}^{\text{ст}} + N_{\text{д}}^{\text{пт}}}{N_{\text{д}}}$, конструктивных элементов в детали $\dfrac{N_{\text{э}}^{\text{у}} + N_{\text{э}}^{\text{ст}} + N_{\text{э}}^{\text{пт}}}{N_{\text{э}}}$, относительное количество совместно обрабатываемых конструктивных элементов $N_{\text{эс}}/N_{\text{э}}$; безразмерные геометрические параметры: относительная высота H/D, относительная толщина стенки S/D, относительная толщина дна $S^{\text{д}}/D$, 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) $\sigma_{\text{в}}^{z}/\sigma_{\text{в}0}, \sigma_{0,2}^{z}/\sigma_{0,2}, HV^{z}/HV_{0}$, где $\sigma_{\text{в}}^{z}, \sigma_{0,2}^{z}, HV^{z}$ – свойства изделия; $\sigma_{\text{в}0}, \sigma_{0,2}, HV_{0}$ – 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 $M_{\text{и}}$, 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 $N_{\text{в}}$ и относительное $N_{\text{в}}/N_{\text{э}}$ 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, к принимаемым за базовые рассчитывают уровни технологичности:

$$K_{\text{ч}j} = \Pi_{\text{т}j}/\Pi_{\text{тб}}, \tag{4.11}$$

где $\Pi_{\text{т}j}, \Pi_{\text{тб}}$ – частные и базовые значения показателей ТКИ.

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

$$\Pi_{\text{т}\Sigma} = \sum_{i=1}^{B} \Pi_{\text{т}j} q_j, \qquad (4.12)$$

где B – общее число принятых для анализа частных показателей ТКИ. Сумма всех «весовых» коэффициентов по всем группам принятых показателей должна быть равной единице:

$$\sum_{j=1}^{B} q_j = 1. \qquad (4.13)$$

Балльная система оценки (трех-, пятибалльная) обеспечивает возможность сопоставления и суммирования показателей ТКИ, имеющих различную размерность, выраженных в абсолютных и относительных величинах. Произведение $\Pi_{rj} q_j$ 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

$$K_{\text{у}\Sigma} = \Pi_{\text{т}\Sigma} / (\Pi_{\text{т}\Sigma})\delta, \qquad (4.14)$$

где $(\Pi_{\text{т}\Sigma})\delta$ – 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:

$$Y(\Pi_{\text{т}}, \Pi_{\text{т}\delta}) \to \text{extr} \;\; \Pi_{\text{т}} \in S; \;\; \Pi_{\text{т}}(x) \to \text{extr} \;\; x \in S; \;\; (4.15)$$

$$S: \begin{cases} q_i(x) = 0, \, i = 1, I; \\ h_j(x) \geq 0, \, j = 1, J, \end{cases}$$

где $\Pi_{\text{т}}, \Pi_{\text{тб}}$ – 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.

4.3. Классификация металлических элементов патронов по конструктивно-технологическим признакам

4.3.1. Постановка задачи

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 тел вращения типа полых тонкостенных оболочек (гильз, пульных оболочек, пиростаканов и др.) и сплошных сердечников.

С понятием оболочки в первую очередь ассоциируется представление о геометрической поверхности. В науке о прочности материалов и конструкций – механике деформируемого твердого тела – классификация объектов основана, прежде всего, на особенностях их геометрической формы, определяющий признак которой связан с соотношением характерных размеров. Тела, у которых один размер намного меньше остальных, образуют класс оболочек и пластин.

С этих позиций оболочка – это тело, ограниченное двумя криволинейными поверхностями, расстояние между которыми по нормали, именуемое толщиной стенки оболочки, мало по сравнению с другими размерами. Оболочка как геометрическая поверхность в любой точке характеризуется двумя взаимно перпендикулярными радиусами кривизны, которые называются главными радиусами кривизны: R_1 и R_2. Важнейшим безразмерным геометрическим параметром оболочек служит отношение ее радиуса кривизны к толщине стенки (R/s). В теории оболочек рассматривают два крупных подкласса: тонкостенные и толстостенные оболочки. За граничное значение параметра относительной толщины стенки оболочек принимают отношение $s/R_{гр} = 1/20$.

Подавляющее большинство оболочечных инженерных конструкций – тонкостенные $\left(s/R \le 1/20\right)$. К толстостенным принадлежат конструкции, для которых $s/R > 1/20$.

Если оболочка, кроме названных выше двух поверхностей, не имеет других границ, то она классифицируется как замкнутая. Но из всякой замкнутой оболочки можно сформировать незамкнутую путем ее рассечения плоскостями, проходящими через ее ось и

перпендикулярно к ней. Ключ к классификации оболочек и их элементов дает расчленение определенной базовой конфигурации замкнутой оболочки.

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.

4.3.2. Технологическое подобие

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

При системном подходе укрупненная модель технологического процесса изготовления оболочки представлена в подразд. 1.4 в виде следующего соотношения:

$$\text{ТП}^k = \left\lfloor \left\{C_n^{\,k}\right\},\quad \left\{S^k\right\},\quad \left\{Z_1^k\right\},\quad \left\{Z_2^k\right\},\quad \ldots,\quad \left\{Z_m^k\right\} \right\rfloor,$$

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

Очевидно, что при одинаковых конструктивно-технологических свойствах изготавливаемых оболочек одинакового или различного назначения, характеризуемых векторами, оп-

ределяющими пространство свойств указанных объектов, выполняется условие

$$C_{ni}^{k} \equiv C_{nj}^{k} \tag{4.16}$$

и, как следствие,

$$\{S_i^k\} \equiv \{S_j^k\}, \quad \{Z_{1i}^k\} \equiv \{Z_{1j}^k\}, \quad \{Z_{2i}^k\} \equiv \{Z_{2j}^k\}, \ldots, \quad \{Z_{mi}^k\} \equiv \{Z_{mj}^k\}, \tag{4.17}$$

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

Условия (4.16) и (4.17) суть в обобщенном виде условия технологического подобия, из которых 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 заготовки и применяемой технологической оснастки, и определяются известными из механики сплошных сред теоремами подобия.

Первая теорема выражает условия, при которых две 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.

Выделим из этой теоремы два следствия.

Следствие первое. Подобные физические явления (в нашем случае – технологические процессы изготовления деталей) протекают всегда только в геометрически подобных системах. При этом под геометрическим подобием понимается преобразование евклидова пространства, при котором для любых двух точек A и B и их образов A' и B' имеет место соотношение $|A'B'| = K|AB|$, где K – положительное число, называемое коэффициентом подобия.

Каждое подобие можно рассматривать как композицию движения и некоторой гомотетии с положительным коэффициентом (гомотетия – преобразование евклидова пространства относительно некоторой точки O, ставящее в соответствие каждой точке M

точку M', лежащую на прямой OM, по правилу $OM' = KOM$, где $K \neq 0$ – коэффициент гомотетии).

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

Вторая теорема (π–теорема) отражает независимость физических явлений и закономерностей от выбора системы единиц измерения и формулируется следующим образом.

Всякое соотношение между размерными характеристиками, имеющими физический смысл, представляет собой, по существу, соотношение между отвлеченными безразмерными комбинациями (критериями подобия), которые можно составить из размерных, определяемых и определяющих величин, среди которых должны учитываться физические постоянные, имеющие существенное значение в рассматриваемых явлениях. При этом, если из n величин, связанных функциональной зависимостью, первые K (от a_1 до a_k) обладают независимыми размерностями, а остальные – зависимыми (от $a_{k=1}$ до a_m), то из этих величин можно образовать n–K безразмерных комбинаций.

Третья теорема определяет признаки, по которым можно установить, что два явления (процесса) подобны, и формулируется следующим образом: подобны те явления (процессы), условия однозначности которых подобны и критерии, составленные из условия однозначности, численно одинаковы. На основании этой теоремы выделяются критерии, составленные только из величин, входящих в условия однозначности. Такие критерии называют определяющими. Одинаковость (инвариантность) определяющих критериев является условием, которое должно быть выполнено для обеспечения подобия. Остальные критерии, составленные из двух величин, называемые неопределяющими, получаются инвариантными как следствие установившегося подобия.

На основании применения рассмотренных теорем авторами сформулированы следующие 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 принимаемых для изготовления деталей процессов.

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

Принимая во внимание, что основным прогрессивным методом формообразования элементов деталей является обработка давлением, 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 получили так называемое критериальное уравнение следующего вида:

$$\Phi\left[\overbrace{\frac{x}{e},\frac{y}{e},\frac{z}{e}}^{1};\overbrace{n,m,Bt,\varepsilon_{i\text{р},\ldots},E_{\sigma},\frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_{i0}}}^{2},\overbrace{t_p,b_m,\nu_{S_{\text{ш}}}}^{3},\overbrace{f,\nu,\eta}^{4},\overbrace{\varepsilon_{ij},\sigma_{ij},\tau_{ij},\frac{P_k}{\sigma_{i0}},K}^{5}\right]=0, \tag{4.18}$$

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; $\varepsilon_{i\text{р}}$ –

предельная до разрушения интенсивность деформации при испытании образцов материала на растяжение; $t_p, b_m, \nu_{S_ш}$ – безразмерные характеристики микрорельефа поверхностного слоя детали; f – коэффициент трения; η – динамическая вязкость смазочной среды; ν – скорость деформирования; S_m – средний шаг неровностей поверхности.

В уравнении (4.18) параметры группы *1* характеризует геометрию очага деформации, группы *2* – физико-механические свойства материала детали, *3* – геометрию микрорельефа поверхности детали, *4* – условия пластической деформации; *5* – деформационные и силовые параметры процесса.

4.3.3. Технологический классификатор

Принимая во внимание сформулированные выше постулаты и учитывая, что металлические детали относятся к классу тел вращения, выделим на основе критериального уравнения (4.18) основные классификационные признаки формуемых деталей, характеризующие их технологическое подобие.

Признаки и условия геометрического подобия очагов пластической деформации (устойчивости, разрушения) будут иметь следующий вид:

$$x / l = \text{idem}; \quad y / l = \text{idem}; \quad z / l = \text{idem}. \qquad (4.19)$$

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

$$x / y = \text{idem}; \quad x / z = \text{idem}; \quad y / z = \text{idem}. \qquad (4.20)$$

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 своего 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:

$$\left.\begin{array}{l} \overline{H}_D = H/D \text{ – относительная высота;} \\ \overline{S}_D = S/D \text{ – относительная толщина стенки;} \\ \overline{S}_D^D = S^D/D \text{ – относительная толщина дна или } \overline{S}_H^D = S^D/H, \\ \text{где } D, S, S^D \text{ – наружный диаметр, толщины стенки и дна; так на-} \end{array}\right\} \quad (4.21)$$

зываемые симплексы $\overline{S}_D^D$ и $\overline{S}_H^D$ являются дублирующими.

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

$$H_D = H/D_{\text{ср}}, \quad (4.22)$$

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

Для деталей ступенчатых

$$H_D = \sum_{j=1}^{n_{\text{ст}}} h^j / D^j, \quad (4.23)$$

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

При наличии конических и с криволинейной образующей ступеней их относительная высота определяется по соотношению (4.24). Под ступенью следует понимать цилиндрический (рис. 4.3, *а*), конический (рис. 4.3, *б*), полусферический (рис. 4.3, *в*) и другого вида пространственный конструктивный элемент, ограниченный перепадом диаметров $D^j, D^{j+1}\left(\frac{D^j}{D^{j+1}} \neq 1\right)$, кроме случаев, когда на поверхности имеется канавка (рис. 4.3, *г*) со следующими соотношениями размеров:

$$0{,}5 < f_i/D_i < 0{,}1;\ \ f_i/S_i < 0;\ \ b_i/f_i < 2{,}0. \qquad (4.24)$$

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

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

$$H_D = \sum_{j=1}^{n} \frac{h^j}{D^j} \frac{1}{\left(1 - 2\frac{h^j}{D^j}\,\mathrm{tg}\alpha^j\right)}, \qquad (4.25)$$

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

$$H_{D\min} < H_D < H_{D\max},\ \ S_{D\min} < S_D < 0{,}4,\ \ 0 < S_H^D < 1, \qquad (4.26)$$

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

В табл. 4.1 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_H^D.

Интервалы числовых значений признаков установлены из анализа технологических возможностей процессов штамповки и результатов исследования выборочных статистических совокупно-

стей заготовок и деталей, изготавливаемых в патронной промышленности.

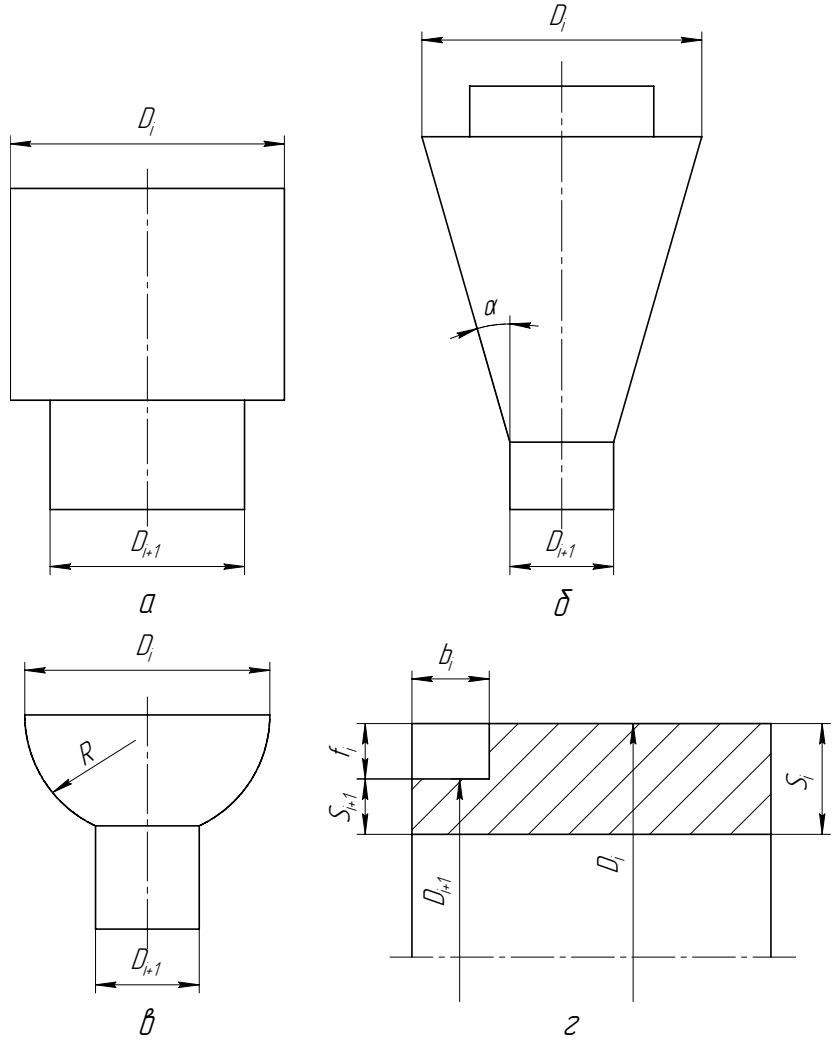


Рис. 4.3. Виды ступенчатых поверхностей: *а*, *г* – цилиндрических; *б* – конических; *в* – с криволинейной образующей

Таблица 4.1

Технологическая классификация металлических элементов патронов по безразмерным параметрам верхнего уровня

Признак классификации	Наименования классификационной группировки	Числовые значения признака	Код классификационной группировки
Относительная высота H/D	Плоские	До 0,03 0,03 … 0,15	0 1
	Низкие	0,16 … 0,25 0,26 … 0,49 0,50 … 0,80	2 3 4
	Компактные	0,81 … 1,25 1,26 … 2,00	5 6
	Высокие	2,01 … 3,00 3,01 … 4,50	7 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 0,09 … 0,02	2 3
	Полые тонкостенные	Менее 0,02	4
	Резервные группировки		5 …9
Относительная толщина дна $S^{д}/H$	Сплошные	1,00 … 0,71	0
	Полые с толстым дном	0,70 … 0,61 0,60 … 0,50 0,49 … 0,41 0,40 … 0,34	1 2 3 4
	Полые с дном средней толщины	0,33 … 0,16 0,15 … 0,09	5 6
	Полые с тонким дном	0,08 … 0,01 До 0,01	7 8
	Полые без дна	0	9

Как следует из таблицы, с увеличением кода классификационной группировки по каждому из признаков H_D, S_D, S_H^D технологичность конструкции детали ухудшается, так как увеличиваются трудоемкость и затраты всех видов ресурсов (см. подразд. 4.2).

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.

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

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

Отсюда

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

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

Следующей характеристикой формы образующей может служить относительный радиус кривой

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

В частном случае $D = 2x^j$.

Для цилиндрических поверхностей

$$K^{j,j-1} = 0; \quad \alpha^{j,j-1} = 0; \quad r_D^{j,j-1} = \infty;$$

для конических

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

для поверхностей с криволинейной образующей

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

В табл. 4.2 приведена технологическая классификация деталей по выделенным признакам среднего уровня.

По тем же признакам, что и в табл. 4.2, описывается геометрия дна детали, соответственно по наружной и внутренней поверхно-

стям с применением тех же качественных и количественных интервальных значений признаков по группам.

Таблица 4.2

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		α ≠ 0	До 2,5	5
		α ≠ 0	2,5 … 7,5	6
		α ≠ 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	α ≠ 0	До 2,5	5
		α ≠ 0	2,5 … 7,5	6
		α ≠ 0	Более 7,5	7
	Ступенчатые	var	var	8

Соответственно при описании деталей по признакам наружной поверхности дна выделим следующие их группы: без дна (0), с плоским дном (1), с коническим (2…4), с выпукло-вогнутым (5…7), со ступенчатым (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 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. 4.3, *г*):

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

По относительному диаметру фланца детали в зоне дна $D_ф/D$ целесообразно выделить группы деталей, приведенные в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Наименование классификационной группы	$D_ф/D$	Код классификационной группы
Без фланца	1,0	0
С узким фланцем	1,00…1,10	1
	1,11…1,25	2
С фланцем нормальной ширины	1,26…1,50	3
С широким фланцем	1,51…2,00	4
	2,01…2,50	5

	2,51 …3,50	6
С весьма широким фланцем	Более 3,50	7

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 характеристики штампуемости ($\varepsilon_{iy}, \varepsilon_{ip}$ $\sigma_{0,2}(\sigma_т)$) и требуемой степени упрочнения материала детали $\sigma_в/\sigma_{в0}$, HV/HV_0.

В табл. 4.4 и 4.5 дана классификация металлических элементов патронов по указанным характеристикам.

Таблица 4.4

Технологическая классификация металлических элементов патронов по параметрам штампуемости

Признак классификации	Наименование классификационной группы	Числовые значения признака классификации				
		$\varepsilon_{iy} = n$	ε_{ip}	$\sigma_{0,2}/\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$ ($\sigma_т$) МПа	Код классификационной группировки
1	2	3	4	5	6	7
Характеристики пластичности и упрочняемости материала	Из материалов весьма высокой штампуемости	> 0,50	> 2,0	< 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	< 0,05	< 0,20	> 0,85	--	4

Окончание табл. 4.4

1	2	3	4	5	6	7
	С весьма низким сопротивлением деформированию	--	--	--	< 15,0	0
	С низким сопротивле-	--	--	--	15,1 … 50,0	1

Характеристики сопротивления материалов деформированию	нием деформированию	--	--	--	50,1…100,0	2
	Со средним сопротивлением деформированию	--	--	--	100,1…200,0	4
		--	--	--	200,1…300,0	4
		--	--	--	300,1…400,0	5
	С высоким сопротивлением деформированию	--	--	--	400,1…500,0	6
		--	--	--	500,1…600,0	7
		--	--	--	600,1…800,0	8
		--	--	--	Более 800,0	9

Таблица 4.5

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 упрочне-	1,51…2,	3

нием	00	
С высоким упрочне-	2,01…2,	4
нием	50	
С весьма высоким уп-	Более	5
рочнением	2,50	

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 НДС и энергосиловым параметрам независимо от абсолютных габаритных размеров изделий, т.е.

$$\varepsilon_{ij} = \text{idem}; \quad \sigma_{ij}/\sigma_{i0} = \text{idem}; \quad \sigma_{к}/\sigma_{i0} = \text{idem}; \qquad (4.29а)$$

$$P/D^2\sigma_{i0} = \text{idem}; \quad M/D^3\,\sigma_{i0}\text{idem}; \quad A/D^3\,\sigma_{i0} = \text{idem}, \qquad (4.29б)$$

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

В табл. 4.6 приведена классификация металлических элементов по размерным параметрам и массе, которые влияют на металлоемкость продукции, технологической оснастки, технологического оборудования, затраты на их эксплуатацию и капитальные вложения.

Таблица 4.6

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 толщины	До 0,5	0	Малой массы	До 0,006	0
	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			

Степень сложности физико-механических свойств деталей, помимо требуемой степени упрочнения, характеризуется видом наносимых на поверхности антикоррозионных, декоративных и опознавательных покрытий, а затраты на основные материалы – видом этих материалов (табл. 4.7).

Таблица 4.7

Классификация металлических элементов по виду применяемых материалов и покрытий

Наименование классификационной группировки	Числовое значение признака	Код классификационной группировки
Из низкоуглеродистых конструкционных качественных сталей	Содержание углерода до 0,15%	0
	Содержание углерода до 0,22%	1
Из низкоуглеродистых высококачественных сталей	Содержание углерода до 0,15%	2
	Содержание углерода до 0,22%	3
Из углеродистой конструкционной качественной стали	Содержание углерода 0,22…0,65%	4
Из углеродистой инструментальной высококачественной стали	Содержание углерода более 0,7%	5
Из металлокерамических твердых сплавов	--	6
Из биметаллов	--	7
Из цветных металлов и сплавов	--	8
Резерв		9
Без покрытий	--	0
С металлическим покрытием	Латунирование Цинкование Никелирование и др.	1 2 3
С неметаллическим покрытием	Пассивирование Фосфатирование Лакирование Окрашивание	4 5 6 7
Резерв	--	8,9

4.4. Методические основы обеспечения технологичности конструкции патронов на стадии проектирования

4.4.1. Цели и задачи обеспечения технологичности конструкции изделия

Цель этапа проектирования по отработке конструкций изделий на технологичность – обеспечение рационального использования трудовых, материальных ресурсов и технологического оборудования для рассматриваемой предметной области.

В соответствии с данными выше определениями понятий технологичности конструкций изделий, технологической рациональности и преемственности конструкций решают 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 технологи-

ческого 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.

4.4.2. Обеспечение технологичности конструкции элементов патрона

В соответствии со сложившимся в теории 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 уточняют назначение и прин-

ципиальную схему, форму изделия, его размерные и безразмерные геометрические параметры, физико-механические характеристики, позволяющие дать по технологическому классификатору (п. 4.3.3) 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 их заимствования. 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, точности 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 (см. рис. 4.2).

Конструкцию каждого элемента патрона следует отрабатывать на технологичность комплексно, учитывая ее зависимость от технологичности исходной заготовки и сборочной единицы, в которую этот элемент входит как составная часть.

Общие технологические требования, предъявляемые к металлическим элементам патронов:

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 об-

ладать 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.

Как следует из вышеизложенного, на любой стадии проектирования патрона должна предусматриваться качественная и количественная оценка ТКИ.

Этапы выполнения этой работы:

- определение исходных данных;
- анализ исходных данных; выбор номенклатуры показателей ТКИ;
- расчет базовых значений показателей 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. 4.4 показан типовой алгоритм отработки конструкции изделия на технологичность. 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;
- 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.

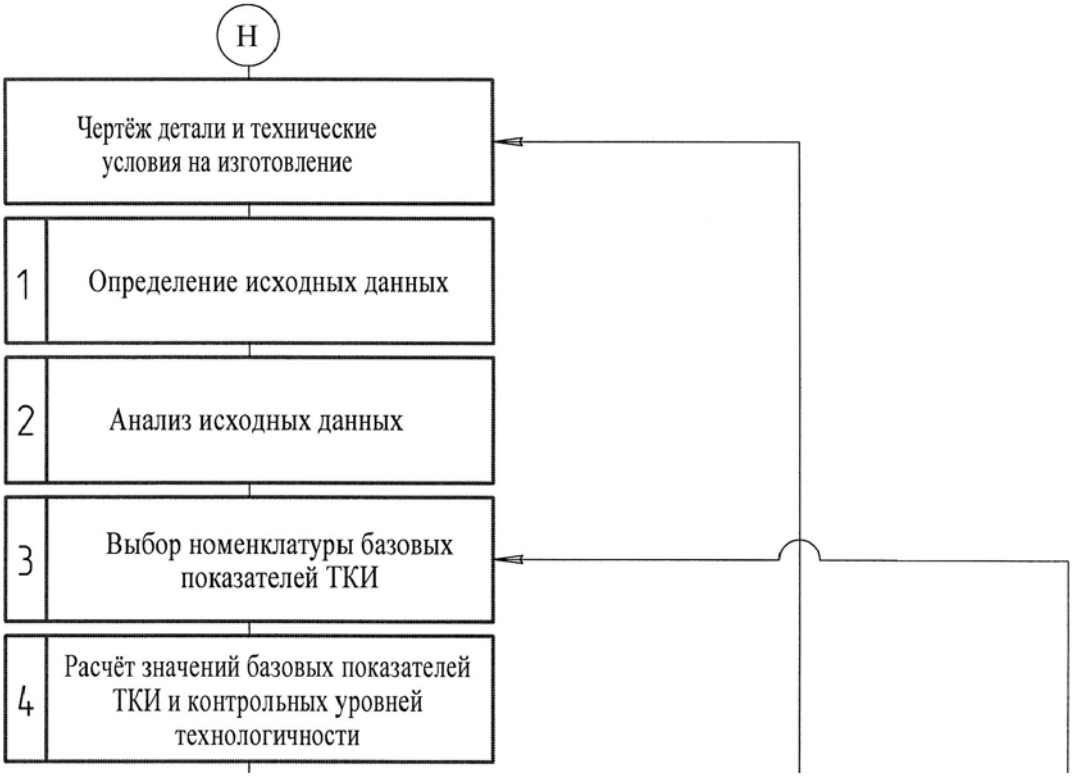
При анализе также могут быть установлены известные аналоги детали, конструкторские и технологические решения, а также даны оценки материальных, трудовых и временных затрат на технологическую подготовку серийного производства. Анализ исходных данных включает подготовку ведомостей структурного состава 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, 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.


Н
Чертёж детали и технические условия на изготовление
1
Определение исходных данных
2
Анализ исходных данных
3
Выбор номенклатуры базовых показателей ТКИ
4
Расчёт значений базовых показателей ТКИ и контрольных уровней технологичности

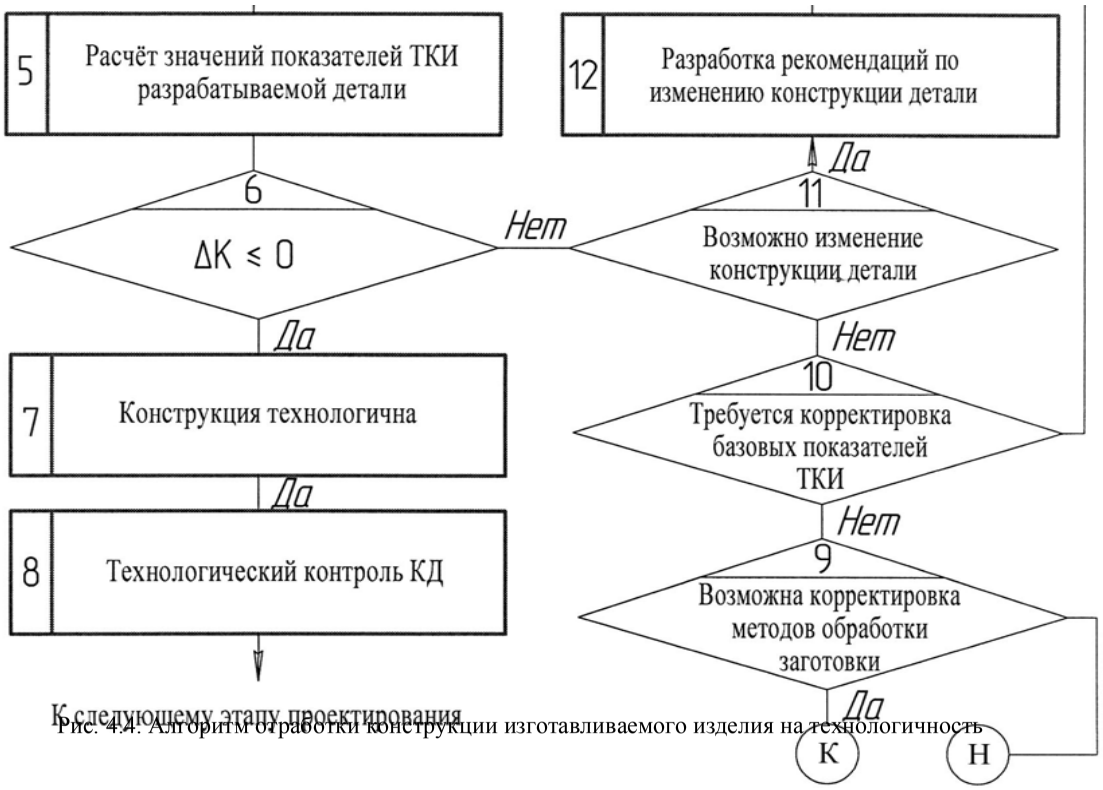


Рис. 4.4. Алгоритм отработки конструкции изготавливаемого изделия на технологичность

При этом обязательно во всех случаях нужно учитывать обрабатываемость материала, сложность геометрической формы детали, физико-механических свойств и т.д.

Для серийного и массового производства обязателен учет показателей, характеризующих стоимость и расход материала, для автоматизированного производства – показателей пригодности конструкции детали к механизации и автоматизации. При жестких требованиях к размерам и физико-механическим свойствам для 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, условий потери устойчивости и разрушения рабочего инструмента.

Расчет параметров ТКИ (рис. 4.4, блок *5*) производится на основе принятой на предыдущем этапе (блок *3*) системы базовых значений частных показателей ТКИ и исходных данных (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 (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

$$K_{\text{ч}j} = \Pi_{\text{т}j} / \Pi_{\text{т}\delta}, \quad K_{\text{у}\Sigma} = \Pi_{\text{т}\Sigma} / \Pi_{\text{т}\text{б}};$$

в) разностных

$$\Delta K_{\text{ч}j}^{I} = \Pi_{\text{т}j} - \Pi_{\text{т}\delta}, \quad \Delta K_{\text{ч}j}^{II} = 1 - K_{\text{ч}j}, \quad \Delta K_{\Sigma}^{I} = \Pi_{\text{т}\Sigma} - (\Pi_{\text{т}\Sigma})\delta, \quad \Delta K_{\Sigma}^{II} = 1 - K_{\text{у}\Sigma}.$$

Целевая функция обеспечения ТКИ для рассматриваемых случаев соответственно будет иметь вид

$$Z_{\text{а}} : \Pi_{\text{т}j} \to \Pi_{\text{т}\delta}, Z_{\text{а}} : \Pi_{\Sigma} \to (\Pi_{\text{т}\Sigma})\delta, Z_{\text{б}} : K_{\text{ч}j} \to \max, Z_{\text{б}} : K_{\text{у}\Sigma} \to \max,$$
$$Z_{\text{в}}^{I} : \Delta K_{\text{ч}j}^{I} \to \min, Z_{\text{в}}^{II} : \Delta K_{\text{ч}j}^{II} \to \min, Z_{\text{в}}^{I} : \Delta K_{\Sigma}^{I} \to \min, Z_{\text{в}}^{II} : \Delta K_{\Sigma}^{II} \to \min.$$

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. Некоторые рекомендуемые методы повышения ТКИ приведены в табл. 4.8.

Таблица 4.8

Методы и приемы, используемые при отработке конструкции изделия на технологичность

Метод (пр	Характеристика метода	Рекомендации по примене-

ием)		нию
1	2	3
Оптимизационный метод выбора конструктивных элементов детали и материалов	1. Обеспечение технологической рациональности конструкции изделия. Выбор наилучших вариантов конструктивных элементов детали по форме, соотношению размеров с учетом критических значений этих параметров и допустимых норм обработки (контрольных уровней технологичности) для принятых методов. 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
Размерный анализ	Совокупность приемов расчленения объекта на элементарные поверхности и связи между ними	Применение целесообразно при простановке размеров и их предельных отклонений
Функционально-стоимостной анализ	Минимизация затрат обеспечения основных функций изделия	Применяется независимо от типа производства на ранних стадиях проектирования

Окончание табл. 4.8

1	2	3
Экономико-математическое моделирование	Описание объектов посредством экономических моделей с применением математических средств	Применение целесообразно при установлении взаимосвязей основных функциональных, конструктивных и технологических характеристик изделия с затратами ресурсов при изготовлении
Типизация конструкции изделия	2. Обеспечение конструктивной преемственности изделия Создание типового образа изделия для множества его конструктивных исполнений	Наиболее эффективен при многократной повторяемости конструктивных схем
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

Заимствование	Выбор конструктивных элементов и материалов из числа существующих	Целесообразен при наличии освоенного производства деталей-аналогов
	3. Обеспечение технологической преемственности конструкции изделия.	
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
Унификация технологических операций	Сокращение разнообразия операций, способов их выполнения и режимов обработки	Применяется в целях повышения загрузки средств технологического оснащения
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

Контрольные вопросы

1. Что понимается под технологичностью конструкции изделия?
2. Какие виды технологичности выделяют при проектировании изделия?
3. На каких стадиях жизненного цикла изделия выполняется анализ и обеспечение ТКИ?
4. Что понимают под технологической рациональностью изделия?
5. Что понимают под преемственностью конструкции изделия?
6. Какие методы оценки ТКИ Вы знаете?
7. Какие показатели ТКИ относят к группе технико-экономических?
8. На какие характерные группы делят технические показатели ТКИ?
9. Какая связь существует между техническими и технико-экономическими показателями?
10. Как определяют уровень ТКИ?
11. Что понимается под технологическим подобием изделий (деталей)?
12. Как формулируется первая теорема подобия и следствия из нее для процессов обработки давлением?
13. В чем состоят основные принципы технологической классификации металлических элементов патронов?
14. Какие признаки деталей характеризуют их геометрическое подобие?
15. Какие признаки штампуемых деталей характеризуют подобие их физико-механических свойств?
16. Какие задачи решаются при обеспечении ТКИ?

17. Какие технологические требования являются общими, не зависящими от вида изделий и технологии их изготовления?

18. Какие этапы целесообразно выделить при выполнении работы по обеспечению ТКИ?

Библиографический список

1. *Агеев Н.П.*, Богатырев А.В., Афанасьев А.С. Технологические основы конверсии военного производства: Учебное пособие / Под ред. Н.П. Агеева. СПб.: БГТУ, 1996. 248 с.

2. *Агеев Н.П.*, Данилин Г.А., Огородников В.П. Вытяжка в штампах полых тонкостенных деталей машино- и приборостроения. В двух частях. Ч. 2. Проектирование технологических процессов. Тверь: ГЕРС, 1998. 257 с.

3. *Агеев Н.П.* Оценка технологичности конструкции металлических заготовок и деталей, изготавливаемых штамповкой: методические указания к домашнему заданию, курсовому и дипломному проектированию. СПб.: БГТУ, 1988. 59 с.

4. *Агеев Н.П.* Проектирование штамповочных операций. Оценка технологичности конструкций штампуемых заготовок и деталей: Учебное пособие Л.: ЛМИ, 1983. 74 с.

5. *Технологичность* конструкций изделий: Справочник / Под ред. Ю.Д. Амирова. М.: Машиностроение, 1985. 367 с.

5. КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ

5.1. Классификация процессов штамповки

При построении классификации процессы штамповки сгруппированы по признакам их подобия, а не по функциональному назначению изготавливаемых деталей.

Надежным основанием для деления объема рассматриваемых понятий могут служить условия подобия сравниваемых процессов, определяемых известными теоремами подобия.

Согласно теореме подобия, две системы (два процесса штамповки), геометрически подобные, будут физически детально подобными во все соответствующие промежутки времени, если все безразмерные параметры (критерии подобия), которые образуются из заданных по условию процесса величин, будут одинаковыми. Из этой теоремы вытекают два важных следствия:

1) подобные физические явления протекают всегда только в геометрически подобных системах;

2) критерии подобия выводятся из анализа дифференциальных уравнений математической физики, устанавливающих взаимосвязь пространственных изменений во всех физических переменных, характерных для рассматриваемого явления (из дифференциальных уравнений равновесия, уравнения пластичности и других, описывающих процессы деформации).

По существу, условия подобия при построении классификации процессов обработки металлов давлением были ранее сформулированы Г.А. Смирновым-Аляевым в виде двух принципов: 1) обеспечение определенного соотношения в обрабатываемых изделиях свободных и контактирующих с инструментом поверхностей (условие геометрического подобия); 2) обеспечение определенного числового значения показателя жесткости схемы напряженного состояния, возникающего при данном пластическом формоизменении (условие механического подобия).

На основании изложенного представим условия механического подобия процессов штамповки в виде соотношений безразмерных величин, вытекающих из анализа системы определяющих дифференциальных уравнений, которая характеризует НДС заготовки в зоне очага пластической деформации:

$$\left\{\varepsilon_{ij}, \nu_{\varepsilon}, \nu_{\sigma}, K, \frac{\sigma_{\text{к}}}{\sigma_i}, \sigma_{ij}\right\} = \text{idem}^*, \qquad (5.1)$$

где ε_{ij} – обобщенное обозначение линейных и угловых деформаций; σ_{ij} – обобщенное обозначение нормальных и касательных напряжений; $\sigma_{\text{к}}$ – нормальное контактное напряжение.

Целесообразно совокупность приведенных характеристик объединить понятием «механическая схема», а условия (5.1) назвать условиями подобия механических схем. Механическая схема процесса штамповки отображает схему сил, действующих в зоне очага пластической деформации, и определяет характер формоизменения. Процессы штамповки механически сравнимы и, следовательно, могут быть объединены в одну классификационную группу, если они имеют одну и ту же механическую схему или мало различающиеся схемы. Далее, наряду с условиями (5.1), для оценки механического подобия процессов штамповки важное значение имеют условия ограничения деформации в этих процессах. Выделим два из них, которые также отнесем к категории условий механического подобия:

$$e_i / e_{i\text{p}} = 1 = \text{idem} \qquad (5.2)$$

для процессов, сопровождающихся планируемым разрушением деформируемой заготовки;

$$e_i / e_{i\text{p}} < 1 = \text{idem} \qquad (5.3)$$

для процессов, не сопровождающихся планируемым разрушением штампуемой заготовки, где e_i – реализуемая в зоне очага пластической деформации степень деформации; $e_{i\text{p}}$ – предельная до разрушения степень деформации.

В соответствии с этими условиями все штамповочные операции можно объединить в две группы: разделительные, для которых удовлетворяется условие (5.2), и формоизменяющие, для которых выполняется условие (5.3). При выполнении разделительных операций деформирование заготовок происходит вплоть до разрушения. На формоизменяющих операциях разрушение заготовок недопустимо.

Физическое подобие группируемых процессов штамповки предполагает обязательное обеспечение геометрического подобия по деформированному состоянию и выделенным безразмерным геометрическим параметрам очага пластической деформации.

Условия геометрического подобия выражаются через безразмерные отношения координат сходственных точек очага пластической деформации, т. е.

$$\left\{\frac{x_j}{y_j}, \frac{x_j}{z_j}, \frac{y_j}{z_j}\right\} = \text{idem}. \qquad (5.4)$$

Условия геометрического подобия очага пластической деформации в процессах штамповки также могут быть представлены через безразмерные отношения размеров заготовки и рабочего инструмента, влияющих на форму и размеры этого очага. Так, например, характерными для процессов листовой штамповки безразмерными геометрическими параметрами являются относительная толщина штампуемой детали S/d, относительный зазор между пуансоном и матрицей z/S, относительные радиусы сопряжения рабочих поверхностей пуансона $r_{\text{п}}/S$ и матрицы $r_{\text{м}}/S$, отношение поперечных размеров очага пластической деформации D/d, углы конусности рабочего инструмента α, β и другие ($S, D, d, z, r_{\text{м}}, r_{\text{п}}$ – абсолютные толщина и диаметры штампуемой заготовки, зазор, радиусы матрицы и пуансона соответственно).

Так как разделительные операции должны сопровождаться разрушением исходной заготовки, а формоизменяющие не должны, то для обеспечения качества штампуемых деталей необходимо, соответственно, в первом случае стремиться к максимальной локализации очага деформации, а во втором, наоборот, избегать этой локализации. Следовательно, в процессах разделительной штамповки размеры очага пластической деформации должны быть наименьшими, что достигается при малых относительных зазорах и радиусах сопряжения рабочих кромок инструмента $\left(z/S = 0...0{,}2, r_{\text{м}}/S \approx 0, r_{\text{п}}/S \approx 0\right)$. В формоизменяющих операциях зазоры соизмеримы по величине с толщинами заготовок, а радиусы сопряжения, как правило, превышают эти толщины $\left(z/S \geq 1, r_{\text{м}}/S >> 1, r_{\text{п}}/S >> 1\right)$.

Условия геометрического подобия процессов штамповки, выраженные через безразмерные параметры заготовки и рабочего инструмента, будут иметь следующий вид:

$$\left\{\frac{S}{d}, \frac{D}{d}, \frac{z}{S}, \frac{r_{\text{м}}}{S}, \frac{r_{\text{п}}}{S}, \ \alpha\right\} = \text{idem}. \qquad (5.5)$$

Интегральным безразмерным геометрическим параметром служит отношение площадей свободных ($F_{\text{с}}$) и контактирующих ($F_{\text{к}}$) с инструментом поверхностей очага пластической деформации, т. е.

$$\frac{F_{\text{с}}}{F_{\text{к}}} = \text{idem}. \qquad (5.6)$$

С учетом изложенного классификатор процессов штамповки построен в виде иерархической структуры на основе использования понятий части и целого, обобщаемого и обобщающего, правил деления объема понятия и выделенных в качестве классификационных признаков критериев 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 до подгруппы, группы, подкласса и класса (конечный, высший уровень). Единицей сходимости вертикальных рядов служит понятие «процессы штамповки», обобщающее понятия всех сходящихся рядов. В горизонтальных рядах размещаются понятия одного порядка, объединенные по определенному признаку подобия. На высших уровнях классификации предусмотрен учет наиболее общих признаков геометриче-

ского подобия (вида исходных материалов и заготовок, относительной толщины их стенки S_0/d_0 (индекс «0» означает начальное состояние), соотношения $F_с/F_к$ и признаков механического подобия $(K, \sigma_к/\sigma_i)$. По совокупности указанных признаков выделены три класса (листовой, объемной и объемно-листовой штамповки) и 11 подклассов (тонколистовой, толстолистовой, открытой, полузакрытой и закрытой объемной и объемно-листовой штамповки).

Для процессов листовой штамповки характерным является применение листового проката (листов, полос, лент), труб, а также штучных полых заготовок различной формы, получаемых штамповкой либо другими методами обработки.

В процессах объемной штамповки преимущественно применяются сортовой, фасонный прокат и штучные заготовки, получаемые из него различными методами обработки. Однако следует иметь в виду возможность объемной штамповки и при применении заготовок, получаемых из листового проката, труб методами листовой штамповки.

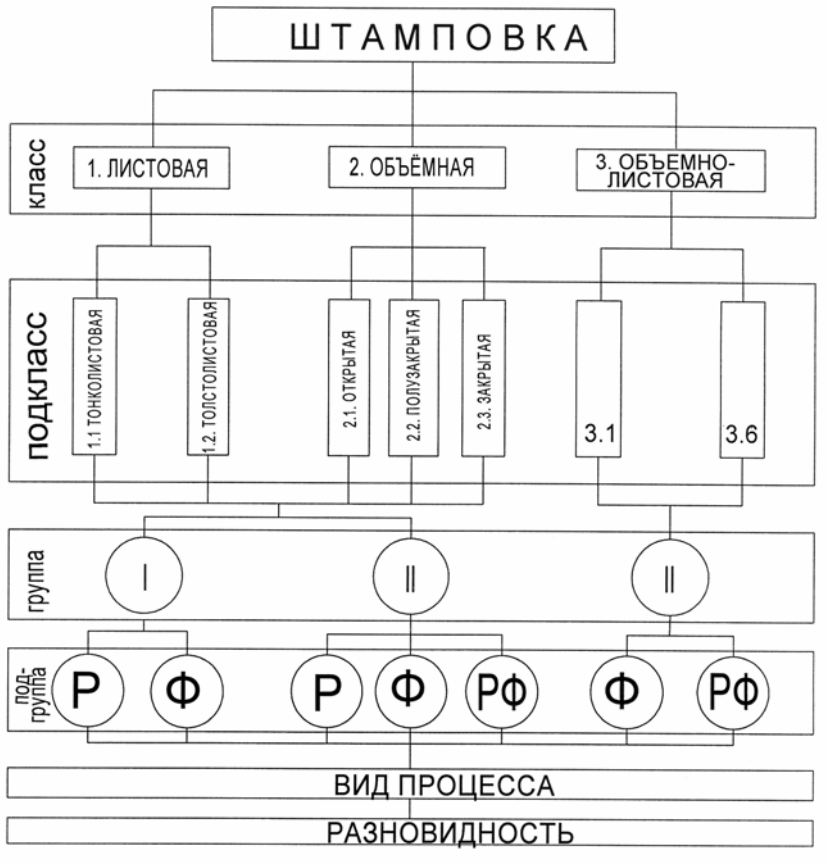


Рис. 5.1. Классификация процессов штамповки: *I* – простая; *II* – комбинированная; Р – разделительная; Ф – формоизменяющая; РФ – разделительно-формоизменяющая

В процессах тонколистовой штамповки схема напряженного состояния в зоне очага пластической деформации, как правило, плоская $(-2 < K < +2)$, так как главное напряжение, направленное по нормали к срединной поверхности, либо равно нулю, либо намного меньше интенсивности напряженного состояния $(-0{,}1\sigma_i \le \sigma_к \le 0)$ на контактной поверхности. Процессы объемной штамповки отличаются объемной схемой напряженного состояния и преобладанием сжимающих напряжений в зоне очага пластической деформации $(K << 0)$. Процессы толстолистовой штам-

повки относятся к классу переходных от листовой к объемной. Они характеризуются объемной разноименной схемой напряженного состояния при двух сжимающих напряжениях.

В соответствии с известными экспериментальными данными по удельным усилиям и контактным нормальным напряжениям примем следующие граничные значения относительного контактного напряжения $\sigma_к/\sigma_i$ для выделенных подклассов: тонколистовая штамповка – до 0,1, толстолистовая – от 0,1 до 1,0, открытая объемная – от 1,0 до 1,5, полузакрытая объемная – от 1,5 до 3,0, закрытая объемная – более 3,0. Необходимо учитывать определенную условность указанных значений.

Верхние граничные значения относительных толщин S/d штампуемых заготовок для процессов тонколистовой штамповки, отвечающих равенству $\sigma_к/\sigma_i = 1$, находятся в интервале 0,05–0,10. Что касается класса процессов объемно-листовой штамповки, то его существование определяется логикой построения классификации, а выделение шести подклассов в его пределах – принципиальной возможностью организации комбинированных процессов на базе сочетания пяти основных подклассов листовой и объемной штамповки.

Следующий, на ступень ниже, уровень классификации предусматривает выделение в каждом подклассе по признакам подобия механических схем простых (I) и комбинированных (II) процессов. При этом формирование простых процессов базируется на выявлении основных механических схем деформации, а комбинированных – на объединении или синтезе различных механических схем, реализуемых в деформируемом объеме заготовки по определенным закономерностям во времени и пространстве. Выше было отмечено, что класс процессов объемно-листовой штамповки в целом относится к процессам комбинированной штамповки на высшем уровне деления.

С учетом условий ограничения деформации (5.2) и (5.3) необходимо в каждой из выделенных классификационных групп различать разделительные, формоизменяющие, а для комбинированных процессов еще и разделительно-формоизменяющие процессы. Примерами простого процесса разделительной листовой штамповки служит вырубка, формоизменяющей листовой штамповки – вытяжка, формоизменяющей объемной штамповки – выдавливание.

На примере процесса вытяжки можно показать, что изменение безразмерного параметра очага пластической деформации (ОПД) z_i/S_{i-1} (z_i – зазор между пуансоном и матрицей на *i*-й операции, S_{i-1} – толщина стенки заготовки на предшествующей операции) существенно влияет на изменение напряженного состояния в нем.

В том случае, если односторонний зазор z_i между пуансоном и матрицей (см. рис. 5.1, *б*) больше толщины исходной заготовки S_{i-1}, процесс именуют вытяжкой без утонения. В этом процессе (при применении исходной плоской заготовки) на основной стадии ОПД при оптимальных условиях вытяжки охватывает только краевую часть заготовки. А из этого следует, что в зоне ОПД преобладают свободные поверхности $F_{св}/F_к >> 1$, а следовательно, схема напряженного состояния на этом участке деформируемой заготовки будет плоской. Главный компонент напряжений σ_n, направленный по нормали к поверхности, будет равен нулю $(\sigma_n = 0)$, тогда как два других главных компонента напряжений не равны нулю и различаются между собой по знаку, т.е. $\sigma_\rho > 0$ – меридиональные напряжения; $\sigma_\theta < 0$ – тангенциальные (окружные) напряжения.

Безразмерные параметры, характеризующие схему напряженного состояния, будут иметь следующие значения:

$$0 \le K = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{\sigma_i} < 2, \quad \sigma_к/\sigma_i = \sigma_n/\sigma_i \le 0{,}10,$$

где σ_i – интенсивность напряженного состояния.

Характеристика вида деформированного состояния для зоны ОПД отвечает интервалу значений $0 \le \nu_\varepsilon \le 1$. Для изотропного материала характеристики вида деформированного и напряженного состояний равны, т.е. $\nu_\varepsilon = \nu_\varepsilon$. В соответствии с изложенным и согласно условиям (5.1)…(5.3) этот процесс относится к тонколистовой формоизменяющей штамповке.

Уменьшение при вытяжке одностороннего относительного зазора до значений $z_i/S_{i-1} < 1$ приводит к увеличению параметра σ_n/σ_i и, как следствие, к созданию, в отличие от предыдущей схемы, объемной схемы напряженного состояния при двух главных сжимающих напряжениях $(\sigma_\theta < 0; \quad \sigma_r = \sigma_n < 0)$ и одном рас-

тягивающем $\left(\sigma_\rho = \sigma_z > 0\right)$. Этот процесс относится к подклассу переходных от листовой к объемной штамповке.

Вытяжка с утонением стенки – вытяжка из исходной полой заготовки с принудительным обусловленным уменьшением ее толщины и весьма малым изменением диаметра. Очаг пластической деформации на стационарной стадии процесса охватывает часть заготовки, которая находится в зазоре между пуансоном и матрицей при одновременном контакте с их поверхностями. Для этого процесса можно ориентировочно принять, что $2{,}0 < F_к / F_с < 3$; $0{,}8 > K > -0{,}5$; $0{,}1 < \sigma_к / \sigma_i < 1{,}0$; $\nu_\varepsilon \cong 0$.

С учетом изложенного этот процесс следует отнести к подклассу толстолистовой формоизменяющей штамповки.

Разновидность процесса штамповки – способ штамповки – рассматриваем как определенную разновидность доминирующей на предыдущем иерархическом уровне механической схемы деформации, учитывающую на своем уровне более полное геометрическое подобие ОПД и заготовки и сопутствующие основной механической схеме технологические воздействия: дополнительное силовое и температурно-скоростное. Понятие о способе штамповки, его свойствах и отличительных признаках, в соответствии с принципом системности, следует рассматривать во взаимосвязи с понятиями сопрягающихся с ним классов, т. е. понятиями об объекте технологии (обрабатываемой заготовке), форме технологического движения и виде технологической среды (инструмента), технологическом оборудовании, их свойствах и отличительных (классификационных) признаках.

Таким образом, признаки для классификации способов штамповки формируются из наиболее важных отличительных признаков каждого из сопрягающихся понятий:

- форма исходной заготовки и штампуемой детали;
- схема приложения дополнительных сил (напряжений);
- тип технологической среды, воздействующей на штампуемую заготовку;
- вид взаимодействия заготовки и рабочего инструмента (форма поверхности контакта и вид движения);

• условия деформации (температура процесса, скорость, характер нагружения, условия контактного трения);

• тип технологического оборудования.

Геометрическое подобие процессов на уровне способов штамповки определяется условиями (5.4)…(5.6), выраженными в безразмерных параметрах ОПД и заготовки.

К дополнительным отнесем силы (прижима, подпора, противодавления, противонатяжения и т.п. или их комбинации), существенно не изменяющие основной механической схемы процесса и отличающиеся по модулю от основных сил примерно на порядок в меньшую сторону.

При классификации способов штамповки по типу технологической среды, воздействующей на заготовку, можно выделить три группы: с применением твердых, податливых (подвижных) и смешанных сред. К твердым средам относятся традиционно применяемые для изготовления штампового инструмента инструментальные металлические, неметаллические, композиционные и армированные материалы, к податливым – эластомеры (резина, полиуретан), жидкость, газ, сыпучие материалы, к смешанным – сочетание твердых и податливых сред.

За классификационные признаки, характеризующие взаимодействие деформируемой заготовки и инструмента, принимаем взаимосвязанные форму геометрического контакта и вид движения. 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 и введении 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, процессы ротационной вытяжки, обжима роликами.

К процессам с линейно-поверхностным контактом следует отнести процессы штамповки, выполняемые способами обкатывания на сферодвижном прессователе.

В процессах с поверхностным контактом технологически эффективными являются все точки, принадлежащие рабочей поверхности инструмента. Для способов штамповки этого класса (традиционных способов штамповки на прессах) характерна независимость траектории 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, и только для некоторых комбинированных процессов штамповки, например осадки с кручением, движение будет сложным.

Примером способа штамповки с реализацией механизма объемного взаимодействия между инструментом и заготовкой может служить магнитно-импульсная штамповка, при которой технологически эффективными являются все точки импульсного электромагнитного поля, заключенные в определенном объеме технологической среды.

Влияние сопутствующей тепловой формы движения учитывается критериями и условиями физического подобия, описывающими реологическое поведение материала штампуемой заготовки. Аналитическое выражение для определения σ_i (предела текучести) аппроксимируют уравнением

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^n \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{\varepsilon_{i0}} \right)^m \exp\left[b\, t_{\text{пл}} \left(1 - \bar{t} \right) \right], \qquad (5.7)$$

где m, b – константы материала, учитывающие влияние скорости деформации и температуры процесса; $\bar{t} = t / t_{\text{пл}}$ – относительная, гомологическая температура; $t, t_{\text{пл}}$ – температура процесса и плавления металла, К.

Отсюда вытекает критерий подобия:

$$\bar{t} = \text{idem} . \qquad (5.8)$$

В основу классификации способов штамповки по температурным условиям принято положение об одновременном протекании при пластической деформации конкурирующих процессов упрочнения и разупрочнения и свойствах диаграммы соответственных предельных состояний. В соответствии с этим установлены граничные значения гомологических температур, характеризующих переход от способов горячей к способам холодной штамповки:

- холодная штамповка с неполным деформационным упрочнением – $\bar{t} < \bar{t}_{н.о}$;
- холодная штамповка с неполным деформационным упрочнением – $\bar{t}_{н.о} < \bar{t} < \bar{t}_{н.р}$;
- полугорячая штамповка – $\bar{t}_{н.р} < \bar{t} < \bar{t}_{к.р}$;
- горячая штамповка – $\bar{t} > \bar{t}_{к.р}$.

Здесь $\bar{t}_{н.о} = t_{н.о}/t_{пл}$, $\bar{t}_{н.р} = t_{н.р}/t_{пл}$, $\bar{t} = t_{к.р}/t_{пл}$ – гомологические температуры, соответствующие началу отдыха, началу и концу рекристаллизации, соответственно.

Классификация способов штамповки по скоростным условиям может быть построена по А.А. Ильюшину, из анализа условий динамического равновесия, который показывает, что критериями, определяющими скоростные условия подобия, являются следующие:

$R_1 = \dfrac{E}{\sigma_i}$ – отношение сил упругого сопротивления к силам пластического сопротивления;

$R_2 = \dfrac{\eta \nu_0}{l_0 \sigma_i}$ – характеристика отношения вязких сил к пластическим;

$R_3 = \dfrac{\tau}{\tau_p}$ – характеристика отношения вязких сил к силам инерции;

$R_4 = \dfrac{\nu_0 \tau_0}{l_0}$ – динамический масштаб времени;

$R_5 = \dfrac{\rho_0 \nu_0^2}{\sigma_i}$ – отношения инерционных сил к силам пластического сопротивления (l_0 – характерный размер деформируемого тела, ρ_0 – начальная плотность материала, ν_0 – начальная скорость деформирования, τ_0, τ и τ_p – характеристическое время, время протекания процесса и время релаксации, η – динамическая вязкость смазочной среды).

В соответствии с этими критериями будем различать следующие способы штамповки: статические (квазистатические), скоростные, высокоскоростные (динамические), импульсные. Для статических процессов полностью применимы условия статического равновесия (волновыми явлениями и инерционными силами при пластической деформации пренебрегают).

Безразмерный параметр R_5 пренебрежимо мал и может не учитываться. Для этих условий характерна зависимость между сопротивлением деформированию и скоростью деформации, близкая к линейной.

Тогда условия подобия для квазистатических изотермических процессов штамповки с учетом вязкости примут вид

$$R_5 = 0;\ \tau_0 = \text{idem};\ \dot{\varepsilon}_i = \text{idem};\ 0{,}5 < m < 1{,}0. \qquad (5.9)$$

Эти процессы будем именовать статическими релаксационными.

В отличие от рассмотренного случая, если вязкие силы сопротивления малы $(R_2 << 1)$ и влияние скорости деформации на сопротивление деформированию выражается в виде степенной функции, то условия физического подобия изменятся:

$$R_3 << 1;\ R_5 << 1;\ \dot{\varepsilon}_i = \text{idem};\ 0 < m < 0{,}5. \qquad (5.10)$$

Способы штамповки, удовлетворяющие этим условиям, назовем статическими деформационными.

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. Условия подобия для этой группы процессов:

$$R_2 \approx 0;\ R_3 << 1;\ R_4 = \text{idem};\ R_5 = \text{idem};\ \nu_0 = \text{idem}. \qquad (5.11)$$

Скоростные процессы штамповки займут среднее положение между статическими и высокоскоростными (динамическими).

Импульсные процессы характеризуются кратковременностью действия, измеряемой микросекундами. Импульсное нагружение имеет место при ударе и взрыве. В деформируемом теле при импульсном нагружении возникают возмущения различной природы (нагрузки, разгрузки, отражения и т. д.), распространяющиеся с определенными конечными скоростями в виде волн возмущений (волн нагрузки и разгрузки, отраженных волн). Возмущения, распространяясь в 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, характеризуемое тензором напряжений и тензором деформации и определяемое природой возмущения. Сопротивление деформированию определяется, главным образом, инерционным сопротивлением (параметром R_5), при этом статической составляющей можно пренебречь. Условия подобия для этой группы процессов будут аналогичны (5.11).

Классификация способов штамповки по законам нагружения во времени предусматривает их деление на непрерывные, полунепрерывные, прерывные с наложением и без наложения на основной процесс механических колебаний различного рода и частоты. При этом прерывные процессы могут быть однозначными и знакопеременными. По условиям контактного трения выделим способы штамповки, в которых реализуются условия граничного и жидкостного трения при различных схемах действия сил контактного трения: активных, пассивных и смешанных. Такое деление определяется направлением сил трения по отношению к направлению течения металла заготовки при штамповке и выявляемым при этом положительным, отрицательным или смешанным эффектам воздействия на напряжения и усилия. Разделение спосо-

бов штамповки по типу используемого оборудования должно соответствовать его классификации.

5.2. Характеристика и область применения процессов листовой разделительной штамповки

К подгруппе процессов листовой разделительной штамповки относятся отрезка, надрезка, вырубка, пробивка, обрезка, зачистка. Технологические схемы простых процессов разделительной штамповки показаны на рис. 5.2.

Отрезка – процесс полного отделения части заготовки в виде листа, полосы, ленты или штучной заготовки по незамкнутому контуру путем сдвига. На представленной схеме (рис. 5.2, *а*) лист,

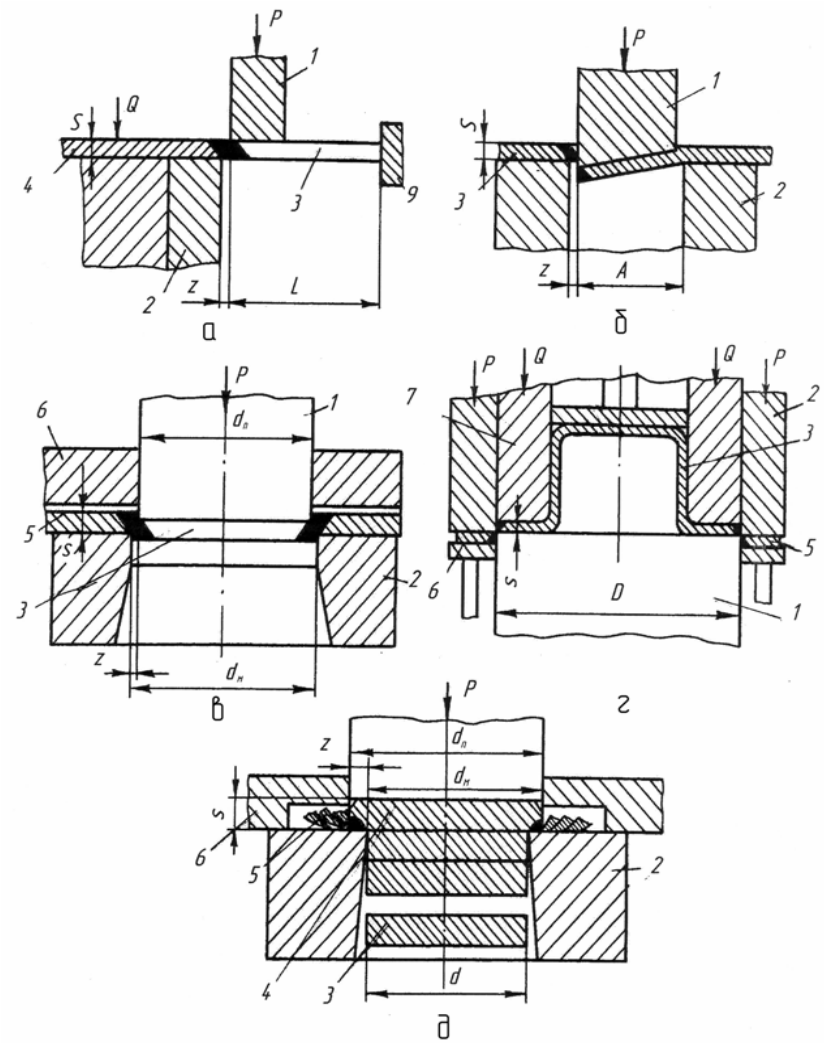


Рис. 5.2. Технологические схемы процессов листовой разделительной штамповки: *а* – отрезки; *б* – надрезки; *в* – вырубки и пробивки; *г* – обрезки; *д* – зачистки; *1* – пуансон (нож); *2* – матрица (нож); *3* – деталь; *4* – заготовка; *5* – отход; *6* – съемник; *7* – прижим; *8* – выталкиватель

полоса или лента *4* подаются до настраиваемого на определенный размер детали упора, и при перемещении верхнего

ножа *1* относительно нижнего неподвижного ножа *2* происходит его внедрение до разрушения материала. Процесс отрезки, в основном, применяется в заготовительном производстве для получения полос из листа и лент из рулонного материала.

Надрезка (рис. 5.2, *б*) – процесс неполного отделения части заготовки по незамкнутому контуру путем сдвига, не сопровождающийся образованием и удалением отхода. Может применяться для формообразования конструктивных элементов деталей в виде выступов – стоек. В патронном производстве практически не применяется.

Вырубка – процесс полного отделения части заготовки по замкнутому контуру путем сдвига (рис. 5.2, *в*). Применяется в патронном производстве преимущественно для формообразования плоских заготовок с различной формой в плане (круг, квадрат, шестигранник) для последующих операций листовой формоизменяющей штамповки (вытяжки без утонения, с утонением, комбинированной вытяжки). В холодноштамповочном производстве изделий другого назначения этот процесс широко используется для изготовления плоских деталей разнообразной формы. На представленной схеме (рис. 5.2, *в*) отштампованная деталь *3* удаляется через отверстие в матрице *2* «напровал», а остаток заготовки – отход *5* – снимается при обратном ходе с пуансона *1* съемником *6*.

Пробивка по определению и технологической схеме близка к вырубке (рис. 5.2, *в*), но состоит в образовании в заготовке (детали *5*) отверстия или паза путем сдвига с удалением части заготовки в виде отхода через отверстие в матрице *2* «напровал».

Основное его применение в патронном производстве – пробивка запальных (затравочных) отверстий в дне гильз и некоторых других элементах патронов (втулках, оболочках и др.). В холодноштамповочном производстве других отраслей используется для получения отверстий и пазов различной формы в плоскостных и полых деталях.

Обрезка – процесс полного отделения по замкнутому контуру излишков металла в виде предусмотренных при-

пусков и дефектных участков заготовки путем сдвига. На рис. 5.2, *г* показан случай обрезки неровного края фланца вытянутой заготовки *3* пуансоном *1* в матрице *2*. Заготовка *3*, поступающая на обрезку, фиксируется на оправке пуансона *1* прижимом *7*. После обрезки деталь *3* удаляется из полого прижима выталкивателем *8*, а отход *5* удаляется съемником *6*.

На рис. 5.2, *д* представлена технологическая схема процесса зачистки, под которым понимается удаление технологических припусков с помощью пуансона *1* и матрицы *2* с образованием стружки *5* с целью повышения точности размеров и уменьшения шероховатости поверхности среза штампованной детали *3* (деталь *6* служит направляющей для исходной заготовки).

На всех технологических схемах выделены (затемнены) зоны ОПД, имеющие ограниченные размеры, соизмеримые с толщиной заготовки *S*. Для всех рассмотренных процессов схемы НДС идентичны и соответствуют сдвигу на срединных (по толщине) поверхностях.

5.3. Характеристика и область применения процессов листовой формоизменяющей штамповки

К группе основных простых процессов листовой формоизменяющей штамповки относятся вытяжка, обжим, раздача, рельефная формовка, отбортовка, калибровка, правка, закатка, гибка, обтяжка и некоторые другие. Процессы гибки, обтяжки в патронном производстве не применяются.

Наиболее распространенным в этой отрасли является вытяжка. Определим ее место в представленной выше иерархической структуре процессов штамповки (см. рис. 5.1). Согласно сложившимся представлениям и производственной практике различают два основных процесса вытяжки: вытяжку без утонения стенки заготовки и с утонением.

Вытяжка без утонения есть процесс формообразования полой детали из листовой плоской или предварительно отштампованной полой заготовки путем уменьшения их поперечных размеров и увеличения высоты при приложении к стенкам деформируемой заготовки тянущих усилий при протягивании через матрицу, но без принудительного обусловленного ее утонения. Очаг пластической деформации на основной стадии процесса при оптимальных условиях вытяжки охватывает краевую часть заготовки (фланец – при использовании плоской заготовки, рис. 5.3, *а*). Ввиду отсутствия обусловленного утонения стенки односторонний относительный зазор между пуансоном и матрицей $z/S > 1$. Из этого следует, что в зонах ОПД преобладают свободные поверхности, т.е. $F_{св}/F_к > 1$, а следовательно, схема напряженного состояния близка к плоской разноименной с меридиональными σ_ρ растягивающими и тангенциальными σ_θ сжимающими напряжениями. Безразмерный параметр P/σ_i, характеризующий относительное гидростатическое давление, получает отрицательные значения $(0 > P/\sigma_i > 0{,}67)$; показатель жесткости схемы напряженного состояния *K* на большей части ОПД имеет положительные значения $(0 < K < 2{,}0)$. Безразмерный параметр $\sigma_к/\sigma_i = \sigma_n/\sigma_i \le 0{,}10$. Характеристика вида деформированного состояния для зоны ОПД отвечает интервалу значений $0 < \nu_\varepsilon \le 1$. Для изотропных материалов $\nu_\varepsilon = \nu_\sigma$.

В соответствии с изложенным и с условиями (5.1), (5.3) этот процесс относится к тонколистовой формоизменяющей штамповке.

Вытяжка с утонением – вытяжка из исходной полой заготовки с принудительным обусловленным уменьшением ее толщины за счет создания гарантированного, калибрующего толщину стенки зазора $z/S < 1$. Очаг пластической деформации на стационарной стадии процесса (рис. 5.3, *б*) охватывает часть заготовки, которая находится в зазоре между пуансоном и матрицей при одновременном контакте с их поверхностями. Для этого процесса можно ориентировочно принять

$$2{,}0 < F_к/F_{св} < 3,\ -0{,}3 < P/\sigma_i < 0{,}5,$$

$$0{,}9 > K > -0{,}5,\ 0{,}1 < \sigma_к / \sigma_i < 1{,}0,\ \nu_\varepsilon = \nu_\sigma \cong 0.$$

В силу приведенных соотношений этот процесс следует отнести к подклассу толстолистовой формоизменяющей штамповки.

Одним из прогрессивных процессов листовой формоизменяющей штамповки является обжим, применяемый для формообразования полых деталей с различной формой образующей, как из малоотходных трубных заготовок, так и из предварительно отштампованных (например, вытянутых или выдавленных) полых заготовок с дном. В патронном производстве обжимом придают окончательную форму и размеры гильзам, пиростаканам, оболочкам и другим деталям.

Под обжимом понимают процесс получения полых тонкостенных деталей с различной формой образующей путем уменьшения поперечных размеров и утолщения стенок деформируемой части заготовки при воздействии на нее сжимающих сил и напряжений, реализуемых при заталкивании заготовки в матрицу. Размеры ОПД отвечают коническому участку заготовки (рис. 5.3, *г*).

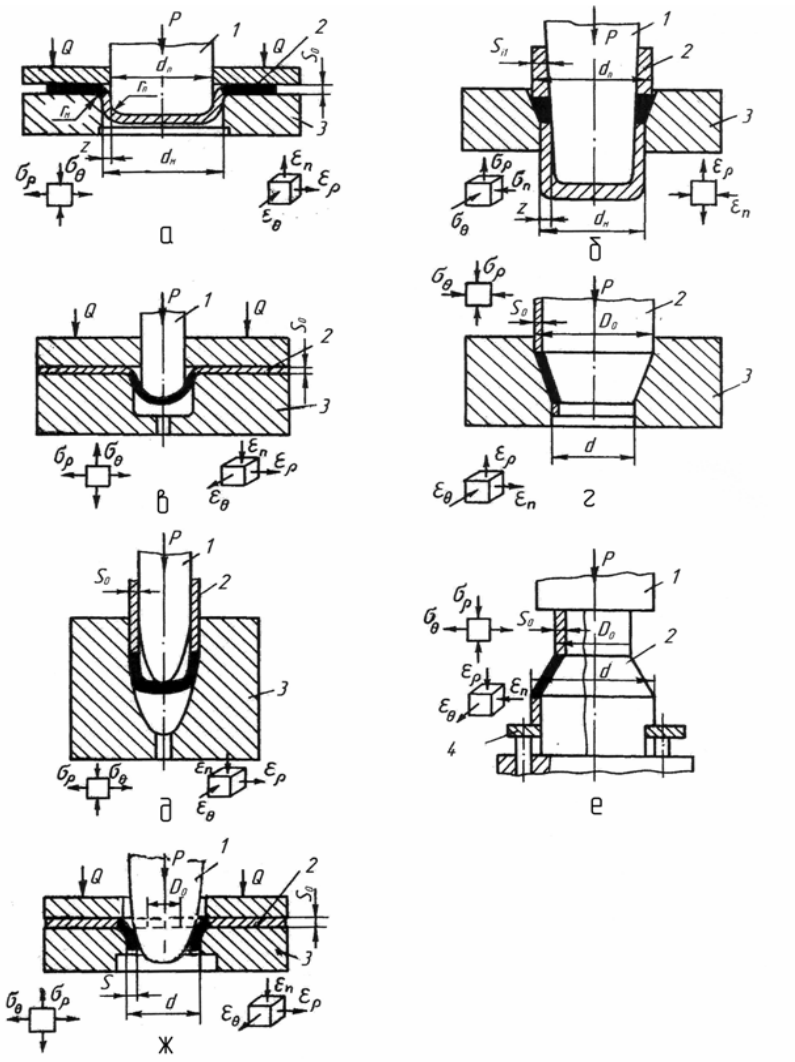


Рис. 5.3. Технологические схемы процессов листовой формоизменяющей штамповки: *а* – вытяжки без утонения с прижимом; *б* – вытяжки с утонением; *в* – рельефной формовки; *г* – обжима; *д* – последующей вытяжки без утонения в матрице с криволинейной образующей; *е* – раздачи; *ж* – отбортовки

В отличие от вытяжки, при обжиме отсутствуют растягивающие напряжения, т. е. оба главных напряжения сжимающие $(\sigma_\rho < 0, \sigma_\theta < 0)$, тогда как напряжение σ_n, направленное по нормали к свободной внутренней поверхности, будет равно нулю

$(\sigma_n = 0)$. При этом другие параметры НДС изменяются в следующих пределах: $0 \le K \le -1,\ 0 \le \nu_\varepsilon \le 1$.

Раздача – процесс формообразования из трубных или полых заготовок с дном полых деталей с различной формой образующей путем увеличения поперечных размеров и утонения стенки заготовки при воздействии тангенциальных (окружных) σ_θ растягивающих и меридиональных σ_ρ сжимающих (в некоторых способах растягивающих) напряжений (рис. 5.3, *в*). Так же как в процессах вытяжки без утонения, при обжиме реализуется плоская схема напряженного состояния ввиду малости σ_n. Раздача применяется преимущественно в сборочном производстве. На рис. 5.3, *д* показана технологическая схема так называемого способа бесступенчатой вытяжки оживальной части пульных оболочек (его первая стадия) в глухих матрицах с криволинейной образующей. Основное формообразование осуществляется за счет деформации дна и придонного участка исходной цилиндрической заготовки, получаемой многооперационной вытяжкой без утонения и с утонением. Краевая часть цилиндрической заготовки не деформируется.

Рельефная формовка – процесс формообразования рельефа в листовой заготовке за счет ее утонения в зоне ОПД (затемненный участок) (рис. 5.3, *в*) при создании двустороннего растяжения $(\sigma_\rho > 0, \sigma_\theta > 0, \sigma_n = 0)$. Этот процесс находит ограниченное применение в патронном производстве, например, для формообразования продольных канавок в гильзах для учебных патронов и для некоторых других деталей.

Отбортовка – процесс образования борта по внутреннему и (или) наружному контуру заготовки путем увеличения поперечных размеров и утонения стенки при действии тангенциальных σ_θ и меридиональных σ_ρ растягивающих напряжений (рис. 5.3, *ж*). Может применяться для образования закругленных бортов на краях полой заготовки.

5.4. Характеристика и область применения процессов объемной штамповки

Так как при объемной штамповке в качестве исходного полуфабриката преимущественно применяется сортовой прокат,

то необходимо, по аналогии с листовой, выделить подгруппы объемной разделительной и формоизменяющей штамповки.

Единственной разновидностью объемной разделительной штамповки, применяемой в патронном производстве, следует считать отрезку цилиндрических заготовок из прутка (проволоки) в штампах для изготовления гильз, сердечников и рубашек, хотя по схеме напряженного состояния «сдвиг» в зоне ОПД отнесение этого процесса к классу объемной штамповки не вполне корректно.

Основными процессами объемной формоизменяющей штамповки, применяемыми в холодноштамповочном производстве, являются осадка, высадка, выдавливание, редуцирование, объемная формовка, чеканка, кернение, клеймение.

Осадка – процесс формообразования сплошных заготовок (деталей) пространственной формы путем уменьшения высоты и увеличения площади поперечного сечения. Очаг пластической деформации распространяется на весь объем исходной заготовки (рис. 5.4, *а*).

Высадка – процесс, аналогичный осадке, но ОПД распространяется только на часть объема исходной заготовки, т.е. имеет локальный характер (рис. 5.4, *б*).

Выдавливание – процесс формообразования полых или сплошных деталей (заготовок), состоящий в вытеснении металла исходной заготовки в полость (открытую или закрытую) и (или) зазоры, образованные рабочим инструментом, путем всестороннего неравномерного сжатия всего или части объема заготовок (рис. 5.4, *в*). При выдавливании исходная заготовка полностью размещается в приемной части (контейнере) матрицы и тем самым ограничиваются до минимума свободные поверхности заготовки.

В отличие от выдавливания, при редуцировании (рис. 5.4, *г*) часть объема исходной заготовки находится вне контакта с рабочим инструментом, что существенно ограничивает, при той же схеме напряженного состояния в зоне ОПД, предельные и допустимые степени деформации, так как возможна потеря устойчивости пластического деформирования внеконтактного участка заготовки диаметром D.

В патронном производстве выдавливание применяется для изготовления стальных и свинцовых сердечников и рубашек, а также для получения полых заготовок гильз.

Объемная формовка состоит в формообразовании сплошных деталей пространственной формы с глубоким рельефом путем вытеснения металла в профилирующие полости штампа при воздействии на него всестороннего неравномерного сжатия.

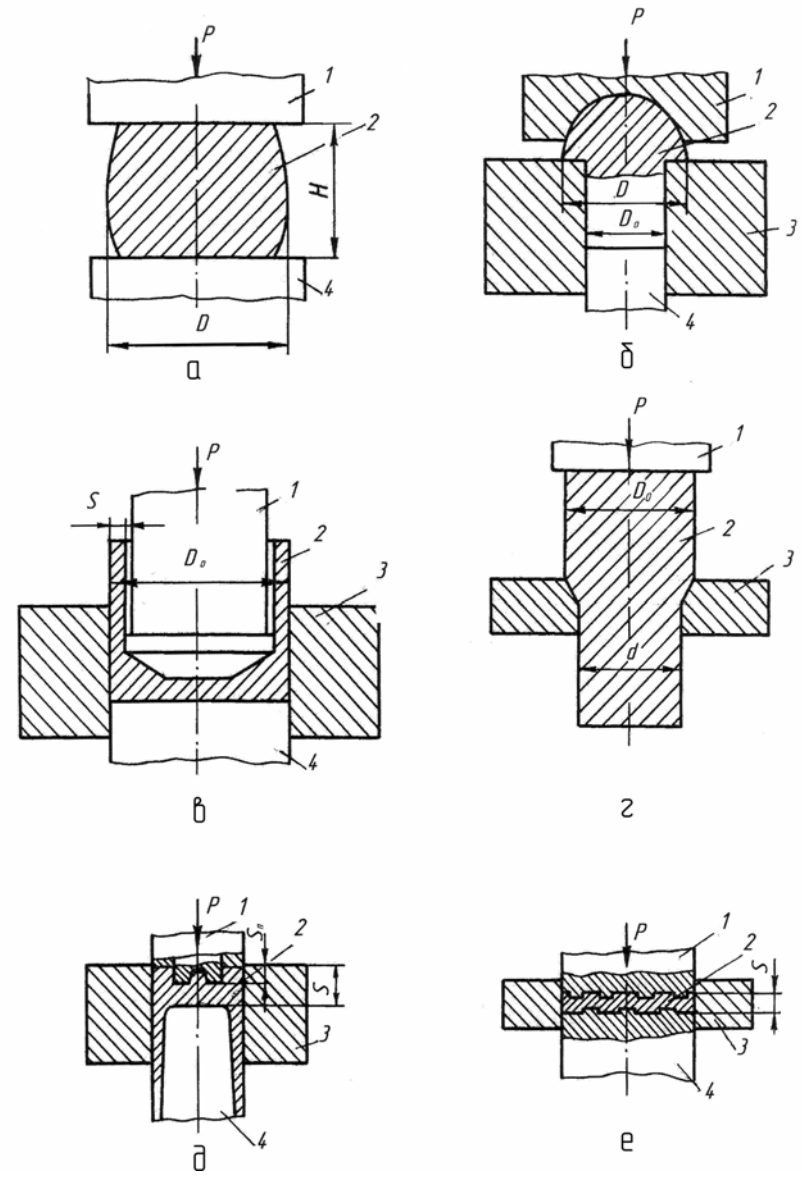


Рис. 5.4. Технологические схемы процессов объемной штамповки: *а* – осадка; *б* – высадка; *в* – выдавливание; *г* – редуцирование; *д* – штамповка дна; *е* – чеканка; *1* – пуансон; *2* – заготовка; *3* – матрица; *4* – выталкиватель (контрпуансон)

Этот процесс может служить аналогом одного из основных процессов – штамповки дна полых заготовок (для гильз, пиростаканов, втулок и т.п. деталей – рис. 5.4, *д*). В этом случае происходит формообразование дна и придонного участка детали, в том числе, например, полости глубиной $h_п$ с наковальней под капсюль-воспламенитель для гильз.

Чеканка – процесс образования на поверхности заготовки (детали) неглубокого одностороннего или двустороннего рельефа путем местного выдавливания (рис. 5.4, *е*). Близким к этому процессу является клеймение, применяемое в патронном производстве для нанесения знаков на наружной поверхности дна гильз.

Кернение состоит в образовании точечных углублений на заготовке путем местного выдавливания и применяется в патронном производстве как штампосборочная операция.

5.5. Характеристика и область применения комбинированных процессов штамповки

Большие резервы по интенсификации производства заложены в применении комбинированной штамповки. В соответствии с

принятой классификацией будем различать листовую, объемную и объемно-листовую штамповку. По способу выполнения объединяемых операций во времени выделяют последовательную, совмещенную и совмещенно-последовательную штамповку.

При последовательной штамповке объединяются несколько разнородных операций, выполняемых последовательно на различных позициях штампа или пресса, при транспортировке заготовки за каждый ход ползуна пресса с одной позиции на другую. Деформация заготовок на каждой из объединяемых операций, при условии выбора оптимальных расстояний между позициями штампа, осуществляется независимо, что полностью исключает взаимодействие деформационных и силовых полей соседних участков заготовки. Технико-экономический эффект в этом случае достигается за счет исключения транспортировки заготовок между прессами, сокращения количества штампов, оборудования и обслуживающего персонала.

Листовая комбинированная последовательная штамповка выполняется по одной из следующих схем:

1) из полосы или ленты с вырубкой (отрезкой) отштампованной детали по наружному контуру на последней позиции штампа;

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 высокопроизводительных прессов с числом двойных ходов до 500 и более в минуту. Преимуществом такой схемы следует считать возможность объединения большого числа отдельных разнородных процессов штамповки для получения небольших деталей сложной формы при толщине более 0,2 мм и повышение производительности, в особенности при многорядной штамповке в ленте;

2) из полосы или ленты с вырубкой и обратной запрессовкой полученной штучной заготовки для последующей формоизменяющей операции обратно в полосу (ленту) для ее транспортировки вместе с полосой на следующую позицию штампа; применяется при изготовлении деталей, требующих только одного формоизменяющего перехода (например, вытяжки) при толщине исходной заготовки 0,3…2,0 мм и числа ходов ползуна пресса до 150 в минуту;

3) из полосы или ленты с вырубкой исходной заготовки по наружному контуру на первой операции и транспортировкой ее на следующие операции специальными механизмами штампа или пресса-автомата; применяется для штамповки деталей с толщиной стенки 0,5–6,0 мм в штампах или прессах, оснащенных шиберными, револьверными, грейферными подачами;

4) из предварительно изготовленной штучной заготовки с ее подачей в штамп и на последующие позиции вручную или специальными механизмами (шиберными, револьверными, грейферными и др.) штампа или пресса-автомата; применяется при изготовлении деталей, требующих, в основном, формоизменяющей штамповки, при числе ходов ползуна пресса менее 120 в минуту.

Более перспективной для патронного производства является комбинированная совмещенная штамповка, объединяющая несколько простых разнородных операций, выполняемых за один ход ползуна пресса на одной позиции комбинированного совмещенного штампа. В различных отраслях промышленности широко применяется листовая комбинированная совмещенная штамповка на основе объединения разделительных, формоизменяющих и разделительно-формоизменяющих процессов. При этом число

объединяемых процессов не превышает четырех. Возможность совмещения зависит от толщины штампуемого материала, которая обычно менее 8 мм, и размеров штампуемой детали, так как при определенных соотношениях наружного и внутреннего контуров детали толщина стенок у пуансонов и матриц может быть весьма малой, что затрудняет их термообработку, снижает прочность и стойкость. Из процессов комбинированной разделительной штамповки наибольшее применение в холодноштамповочном производстве деталей различного назначения имеют вырубка–пробивка, вырубка–зачистка, надрезка–вырубка, пробивка–обрезка, обрезка–отрезка. Значительный интерес представляют процессы совмещенной формоизменяющей штамповки. В отличие от комбинированной последовательной штамповки за один ход ползуна пресса заготовка проходит через несколько позиций штампа, расположенных чаще всего по вертикали.

Если взять за основу классификации временно-пространственный признак реализации пластической деформации, то все совмещенные комбинированные процессы могут быть разделены на две подгруппы: совмещенно-последовательные и одновременные (рис. 5.5).

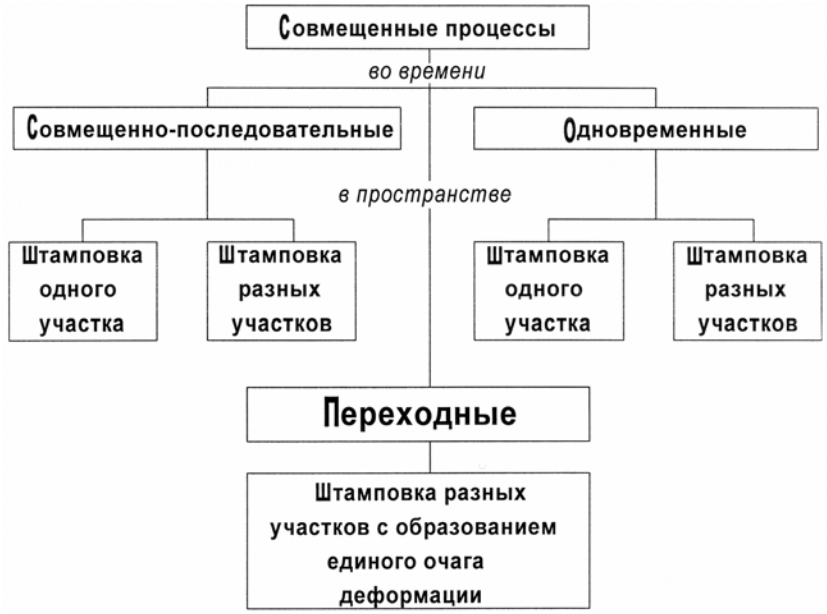


Рис. 5.5. Классификация комбинированных совмещенных процессов штамповки

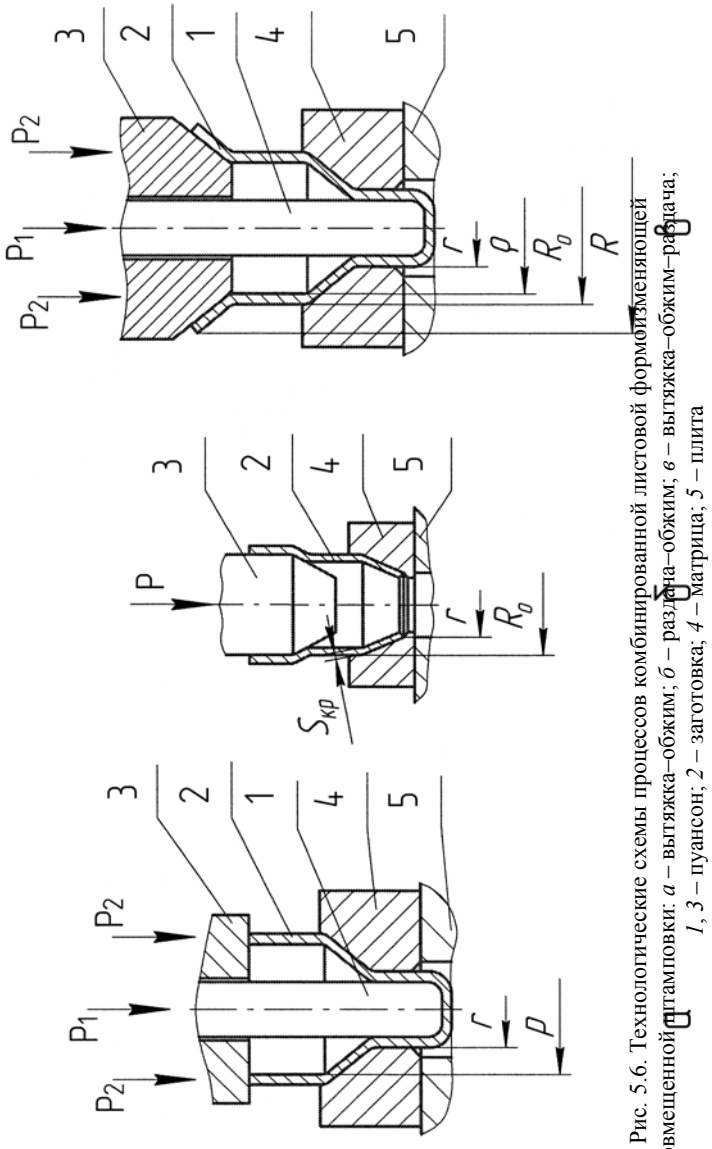


Рис. 5.6. Технологические схемы процессов комбинированной листовой формообразующей совмещенной штамповки: *а* – вытяжка–обжим; *б* – раздача–обжим; *в* – вытяжка–обжим–раздача; *1*, *3* – пуансон; *2* – заготовка; *4* – матрица; *5* – плита

К совмещенно-последовательным относятся те процессы, в ко-

торых каждая из объединяемых операций осуществляется после-

довательно во времени и не влияет на схему НДС заготовки предыдущего и (или) последующего перехода. При этом могут обрабатываться один (вытяжка без утонения–обжим – рис. 5.6, *а*) вытяжка с утонением–редуцирование (рис. 5.7, *в*), вытяжка–выдавливание (рис. 5.7, *а*, *б*)) или разные участки заготовки (вытяжка без утонения – рельефная формовка, вытяжка–штамповка дна, вытяжка–обрезка и др.). Такой характер совмещения предполагает в период пауз между переходами полную или частичную разгрузку.

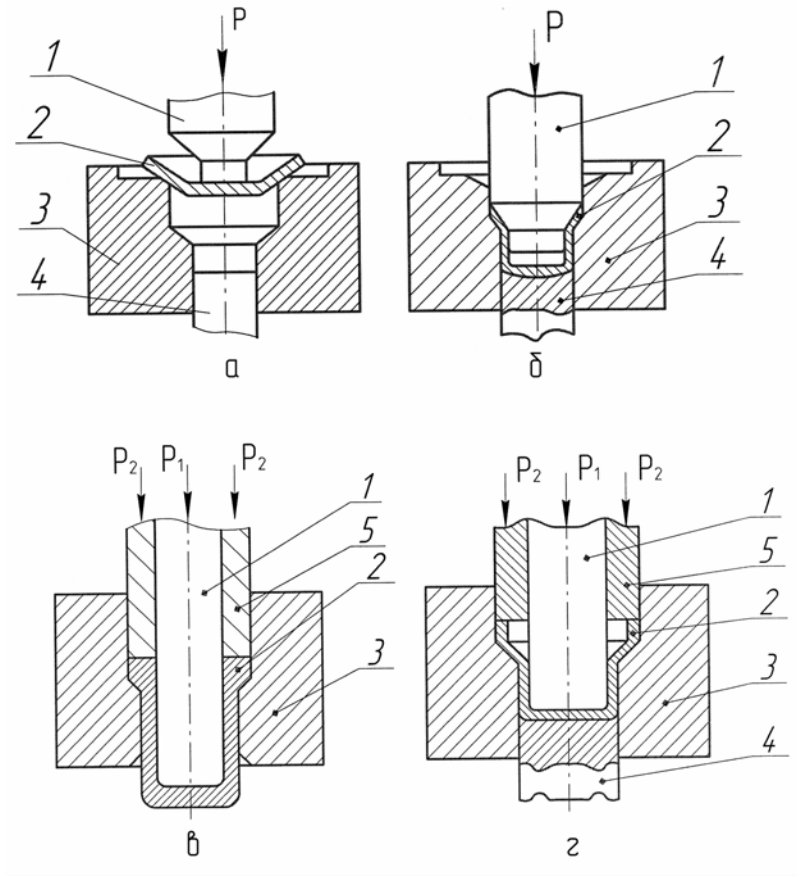


Рис. 5.7. Технологические схемы процессов объемно-листовой штамповки: *а*, *б* – вытяжка–выдавливание; *в* – вытяжка с утонением–редуцирование; *г* – вытяжка с подсадкой кромки; *1* – пуансон; *2* – заготовка; *3* – матрица; *4* – выталкиватель; *5* – подпор

В совмещенных одновременных процессах их технологические возможности во многом определяются степенью наложения друг на друга зон интенсивной деформации и силового взаимодействия. Даже при обработке различных участков заготовки могут существенно изменяться условия штамповки для каждой из объе-

диняемых операций, в результате чего обеспечивается увеличение допустимой степени деформации (например, при вытяжке–раздаче).

Для переходных процессов при совмещении силовых и деформационных полей возможно образование качественно новых схем комбинированной штамповки с особенностями, не присущими каждой операции в отдельности (например, вытяжке–выдавливанию – рис. 5.7, *а*, *б*).

Характерным для таких процессов является формирование на начальных этапах штамповки нескольких локализованных ОПД, а затем их слияние и образование единого ОПД. На ранних стадиях материал заготовки испытывает плоское напряженное состояние, а затем объемное (вытяжка–выдавливание, вытяжка–раздача–объемная формовка). Общим признаком для рассматриваемой подгруппы процессов является действие осевой силы, втягивающей заготовку в рабочую часть матрицы, а одним из критериев предельной деформации – возможность разрушения заготовки. Приложение дополнительных сил повышает несущую способность опасного сечения заготовки и обеспечивает достижение большей допустимой степени деформации.

На рис. 5.8 в качестве примера приведена классификация комбинированных процессов, синтезированных на базе двух выделенных видов вытяжки: без утонения и с утонением, относящихся к различным подклассам. Сочетание вытяжки без утонения и с утонением позволяет сформировать качественно новый процесс комбинированной вытяжки, обеспечивающий формообразование детали как путем уменьшения поперечных размеров исходной заготовки, так и обусловленного ее утонения. Сочетание выявленных трех видов процесса вытяжки с процессами разделительной (Р), формоизменяющей (Ф) листовой и объемной штамповки позволяет выявить состав комбинированных формоизменяющих (Ф) и разделительно-формоизменяющих процессов (РФ).

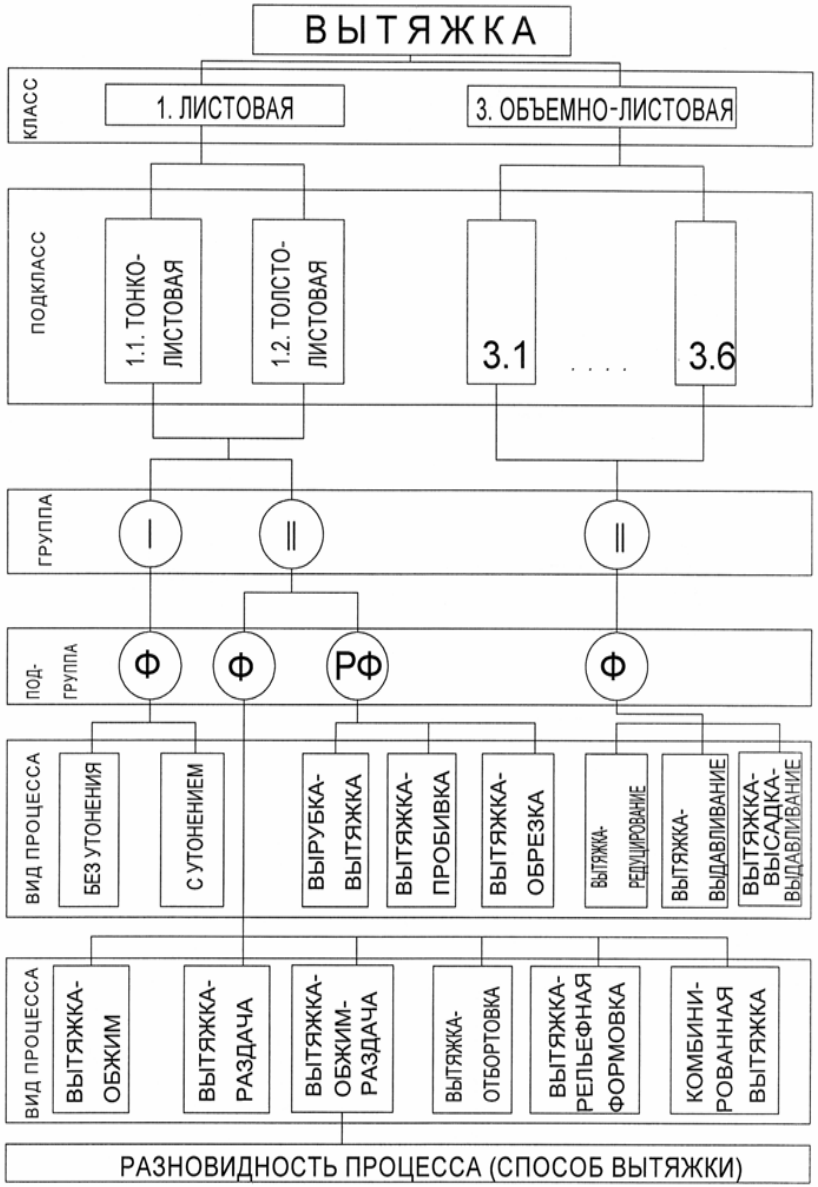


Рис. 5.8. Классификация процессов вытяжки

Контрольные вопросы

1. В соответствии с какими принципами построена классификация процессов штамповки?
2. В чем состоит условие механического подобия процессов штамповки?
3. В чем состоит условие геометрического подобия процессов штамповки?
4. Какие признаки определяют понятие разновидности процесса – способа штамповки?
5. Какие процессы относятся к подгруппе листовой разделительной штамповки?
6. Какие процессы относятся к подгруппе листовой формоизменяющей штамповки?
7. Что понимается под технологической схемой процесса штамповки?
8. Какие процессы относятся к классу объемной штамповки?
9. Какие виды исходных полуфабрикатов могут применяться в процессах листовой и объемной штамповки?
10. Какие преимущества и недостатки имеют процессы объемной штамповки по сравнению с процессами листовой штамповки?
11. Какие преимущества и недостатки имеют процессы комбинированной штамповки по сравнению с простыми процессами?
12. Дайте определения понятий основных процессов листовой разделительной штамповки и составьте их технологические схемы.
13. Приведите определения понятий основных процессов листовой формоизменяющей штамповки и составьте их технологические схемы.
14. Приведите определения понятий основных процессов объемной штамповки и составьте их технологические схемы.
15. Составьте примеры технологических схем процессов листовой комбинированной штамповки, относящихся к подгруппам разделительной, формоизменяющей и разделительно-формоизменяющей штамповки.

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 / Под ред. А.В. Лясникова. СПб.: Внешторгиздат-Петербург, 1995. 527 с.

2. *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: ГЕРС, 1997. 336 с.

6. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ПАТРОННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

6.1. 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 формирования 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:

- • недефицитность 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.

6.2. Виды материалов и сортамент

Все металлические конструкционные материалы делят на три группы: 1) черные прокатные металлы и сплавы (преимущественно стали); 2) цветные прокатные металлы и сплавы; 3) биметаллы.

В табл. 6.1 приведены области применения основных металлических конструкционных материалов в патронном производстве.

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.

Таблица 6.1

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	Трубка	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
		Латуни	
Латунь Л70	Гильза	12,7	Полоса DПР×М8,4×190 OHD
Латунь Л90	Наконечник	12,7 14,5	Лента 0,6×80

Биметаллы			
Биметалл 1	Гильза	7,62 9,0	Полоса 3,2×123×750…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

Окончание табл. 6.1

1	2	3	4
Биметалл 3	Оболочка	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
Свинец С1, С2, С3, С4	Сердечник	Для пуль обычного назначения клб. 9	Проволока диаметром 5,0…25,0
	Рубашка	Для пуль различного назначения и различ-ных клб.	
Конструкцион-ные качественные стали: а) малоугле-родистые (Ст 10, Ст 15, Ст 20) б) со средним содержанием углерода (Ст 30, Ст 45) в) с высоким содержанием углерода (65Г, 70, 75)	Сердечник для обыкновен-ных пуль	5,45	Проволока 5,0…9,0
		7,62	
		9,0	
Инструмен-тальная углеродистая сталь (У10А., У12А, У12ХА)	Сердечник для бронебойных пуль	7,62	Пруток 10,9…12,43
		12,7	
		14,5	
Металлокера-	Сердечник	12,7	

мический твердый сплав	для бронебойных пуль	14,5	Порошок
Алюминий (А00, А0, А1, А2, А3, АD, АD1) Медь М1, М2	Стаканчики, колпачки		—

6.3. Цветные металлы и сплавы

6.3.1. 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. 6.2). 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 характеризуется диаграммой состояния (рис. 6.1), которая включает в себя пять простых перитектических диаграмм.

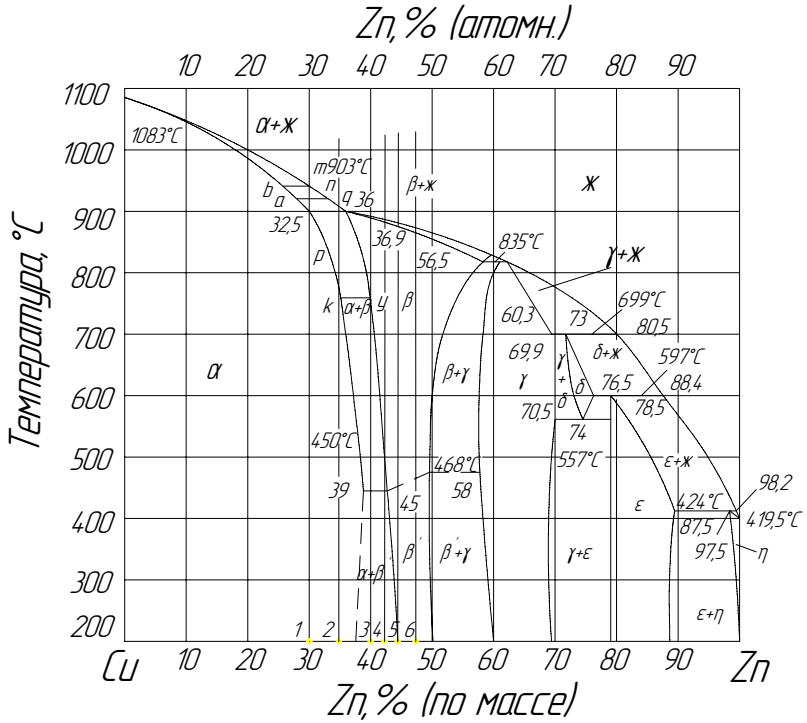


Рис. 6.1. Диаграмма состояния медь–цинк

По отдельным ветвям ликвидуса из жидкости кристаллизуются 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, α+β-латуни).

Богатая медью фаза α имеет решетку меди (гранецентрирован-

ный куб с периодом a = 3,608 Å) и является типичным твердым раствором замещения, в котором 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 % цинка. Фаза β является также твердым раствором, но основой его служит химическое соединение CuZn с решеткой объемно-центрированного куба с периодом a = 2,94 Å. 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. 6.1). Фаза γ является твердым раствором на основе нового химического соединения Cu_5Zn_8 (со сложной кубической решеткой с периодом a = 8,83 Å).

Таблица 6.2

Химический состав двойных латуней, обрабатываемых давлением, %

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

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. 6.1) 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% Zn, и во избежание хрупкости их обработку производят в горячем состоянии. На рис. 6.1 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

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

(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. 6.2). Размер зерна рекристаллизованной α-латуни зависит от степени деформации, 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)

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

(в скобках указано изменение состава твердой и жидкой фаз);

2-я стадия (перитектическая кристаллизация)

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

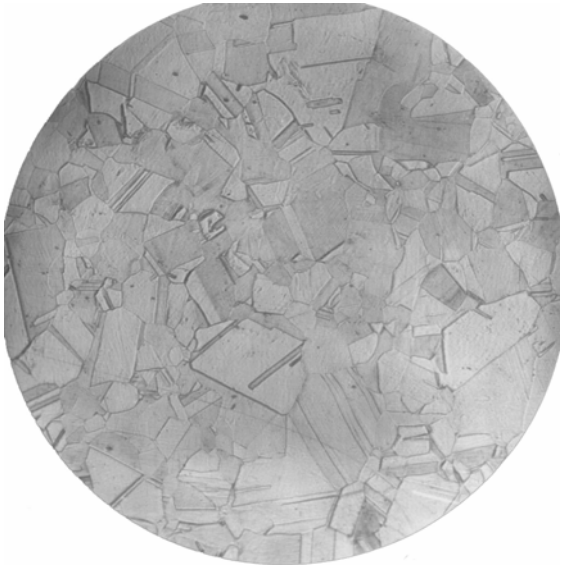


Рис. 6.2. Типичная микроструктура отожженной α-латуни Х75

Так как в данном случае перитектическая реакция протекает при недостатке жидкой фазы, то растворяется только незначи-

тельная 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.

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

(при содержании цинка 32 %–33 %, точка *k* будет располагаться в области более высоких температур).

При температуре, соответствующей точке *k* на диаграмме состояния, β-фаза полностью растворяется, и при дальнейшем охлаждении, вплоть до комнатной температуры сплав находится в однофазном состоянии. Однако все сказанное относится к тому случаю, когда сплав охлаждается медленно и все фазовые превращения проходят полностью. Практика показывает, что в производственных условиях в сплавах с содержанием 32% Zn можно обнаружить β-кристаллы, не успевшие раствориться в α-фазе при быстром 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 имеют 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 оптимальными являются составы двухкомпонентных латуней, содержащие цинка 25…32% (рис. 6.3, 6.4). Однако существенным недостатком двухкомпонентных латуней является склонность к коррозионному, или, иначе, “сезонному”, растрескиванию при длительном хранении. Условия возникновения коррозионного растрескивания – 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).

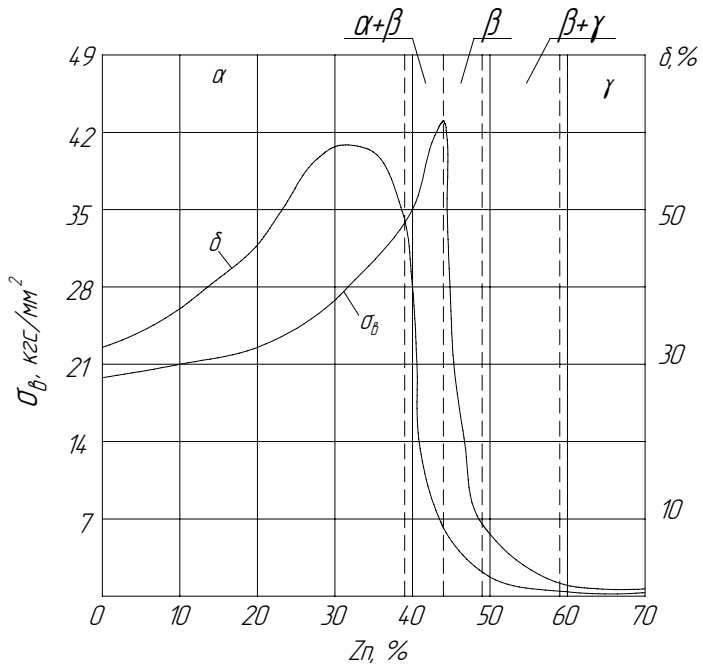


Рис. 6.3. Механические свойства литых медноцинковых сплавов в зависимости от содержания цинка

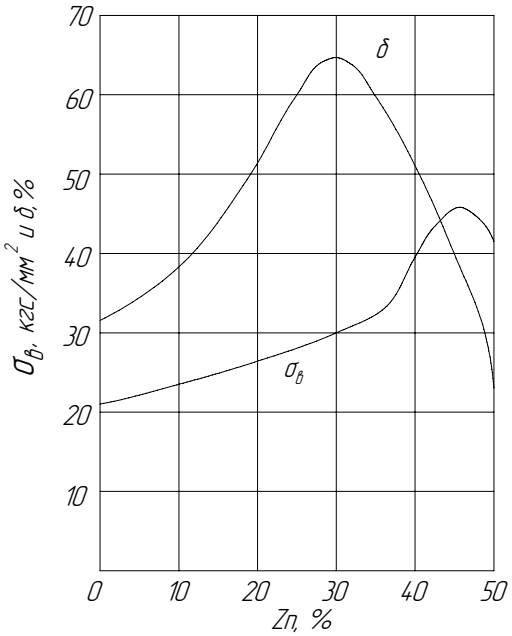


Рис. 6.4. Влияние содержания цинка на механические свойства прокатанных и отожженных медноцинковых сплавов

Латуни, содержащие не более 7…10 % цинка, малочувствительны к коррозионному растрескиванию, с содержанием цинка 30% и более (марок Л68, Л62 и др.) – наиболее чувствительны при относительно длительном, негерметичном хранении в складских условиях. Поэтому для производства латунных гильз одноразового использования к патронам стрелкового оружия клб. 12,7, при герметичной укупорке предпочтительно применение латуни Л70. Для предотвращения коррозионного растрескивания артиллерийских гильз, изготовленных из латуни Л70, при их негерметичном хранении в технологические процессы изготовления гильз вводился низкотемпературный отжиг готовых деталей при температуре 270±10°С, что обеспечивало частичное снятие остаточных напряжений без существенного изменения механических свойств. Эта технология не исключала полностью коррозионного растрескивания при длительном хранении. При этом наблюдались случаи растрескивания по корпусу у фланца и полотну дна, а также по дульцу в зонах запрессовки снарядов. В дальнейшем для изготовления артиллерийских гильз была разработана специальная мно-

гокомпонентная латунь, более устойчивая против коррозионного растрескивания.

В табл. 6.3 приведены нормированные по стандарту (ГОСТ 2208-75) механические свойства латуней, в табл. 6.4, 6.5 – их основные свойства.

Таблица 6.3

Механические свойства латуней

Марка латуни	Состояние материала	$\sigma_в$, МПа	δ, % не менее	ψ, %
Л96	Мягкий Твердый	225 -393 не менее 353	52 2	— —
Л90	Мягкий Твердый	235 - 343 не менее 353	35 3	80 —
Л85	Мягкий Твердый	255 - 363 не менее 392	38 3	85 —
Л80	Мягкий Твердый	265 - 372 не менее 392	40 3	70 —
Л70 и Л68	Мягкий Твердый	294 - 372 не менее 519	42 10	66 —
Л62	Мягкий Твердый	294 - 412 490 - 617	38 4	66 —

Таблица 6.4

Физические свойства латуней

Марка латуни	Модуль упругости *E*, ГПа	Плотность ρ, г/см^3	Коэффициент линейного расширения $\alpha\ 10^5$, 1/°С	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м, °С)	Удельная теплоемкость С, кал/(г, °С)
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

Таблица 6.5

Технологические свойства латуней

Марка латуни	Температурный интервал рекристаллизационного отжига, °С	Температуры дорекристаллизационного отжига, °С	Обрабатываемость резанем, %	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

Примечание. 1. За 100 % обрабатываемость резанием принимается для латуни ЛС63-3.

2. В качестве покровного флюса для всех сплавов применяется древесный уголь.

В табл. 6.6 и на рис. 6.5, 6.6 приведены значения характеристик механических свойств латуни Л70, а на рис. 6.7 – диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$, полученные по результатам исследования авторов.

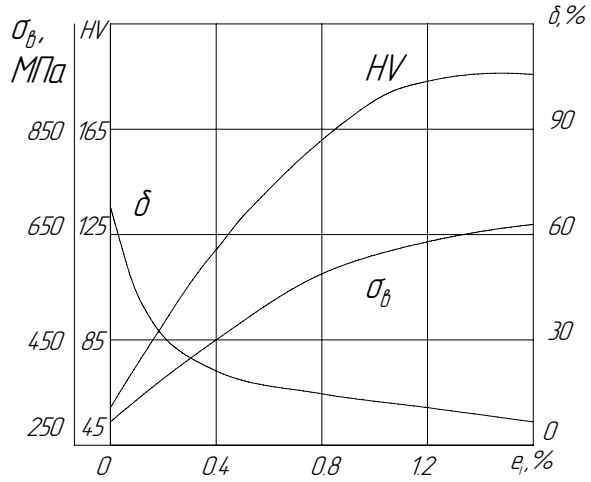


Рис. 6.5. Зависимость характеристик механических свойств латуни Л70 от степени деформации

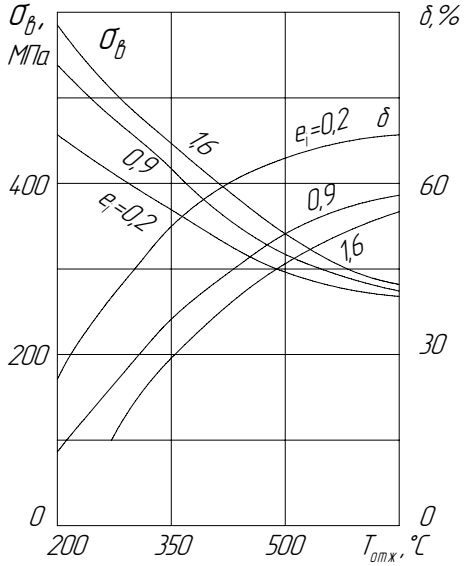


Рис. 6.6. Зависимость характеристик механических свойств наклепанной латуни Л70 от температуры последующего отжига

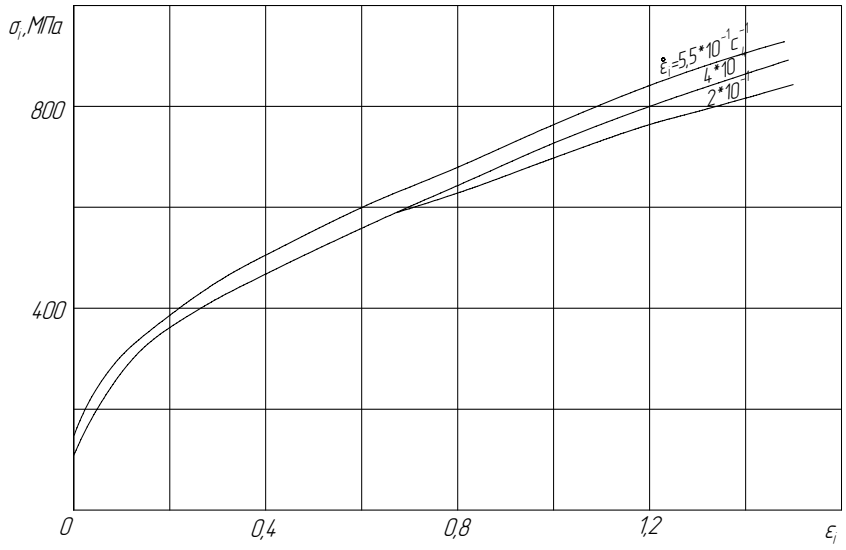


Рис. 6.7. Диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ латуни Л70 при различных скоростях деформации

Таблица 6.6

Механические свойства латуней по результатам исследований

Марка латуни	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	σ_{iy}	$S_к$	ε_{iy}	ε_{ip}	ψ_y	ψ_p
	МПа						%	
Л96	122	309	401	588	0,27	1,00	–	–
Л70	83	316	505	1117	0,47	1,58	0,38	0,79
Л68	78	318	495	1069	0,44	1,50	0,36	0,78

Диаграммы “интенсивность напряжений – интенсивность деформаций” $\sigma_i - \varepsilon_i$ могут быть аппроксимированы аналитическими зависимостями в виде:

а) степенной функции $\sigma_i = 710 \cdot (\varepsilon_i)^{0,45}$, МПа, если $0,002 \le \varepsilon_i \le$ $\le 2\varepsilon_{iy}$, $\sigma_i = \sigma_{iy} \cdot 2^{\varepsilon_{iy}} (1 + 0,5\varepsilon_i - \varepsilon_{iy})$, МПа, если $2\varepsilon_{iy} \le \varepsilon_i \le \varepsilon_{ip}$;

б) многочлена $\sigma_i = 1220 - 1412e^{-\varepsilon_i} - 28e^{-15\varepsilon_i}$, МПа.

6.3.2. Свинец

Среди других технических материалов свинец 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, высокую плотность монтажа элементов пули и, соответственно, ее требуемые баллистические свойства.

Физические свойства свинца:

Атомный вес…….....	207,19
Кристаллическая решетка…….....	г.ц.к.
Периоды решетки, *A*……..…….....	$a = 4{,}9389$
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 ($T_{\text{р}} \cong 0{,}4T\ \text{К} \cong -53^{\circ}\text{С}$).

Технический свинец всегда содержит примеси. Содержание свинца составляет в марках: С1 – 99,985 %, 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).

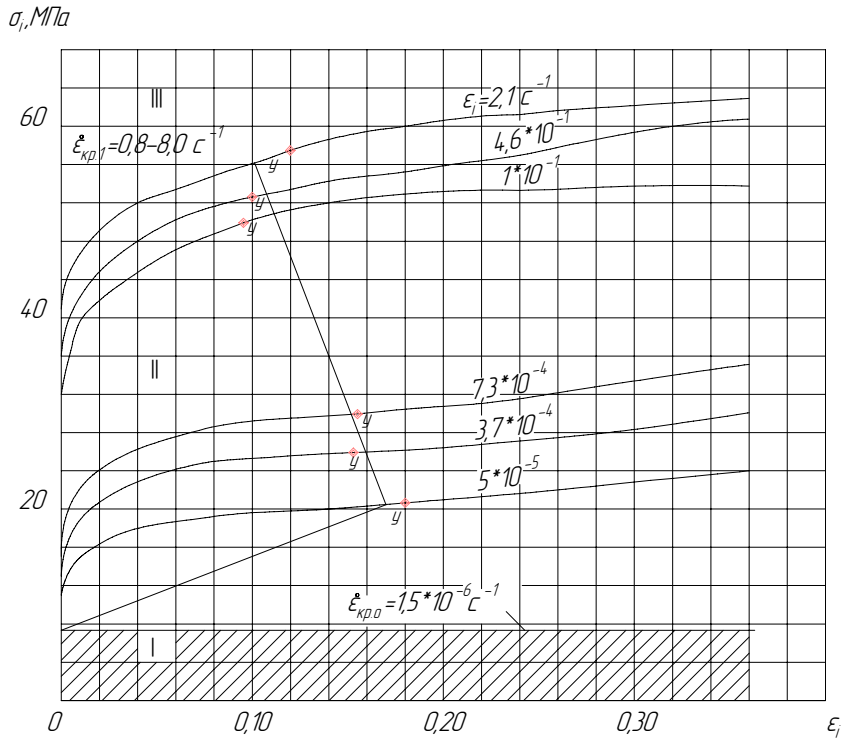


Рис. 6.8. Диаграммы σ_i – ε_i для свинца с добавкой 1% сурьмы при различных скоростях деформации: *I* – область условной «горячей» деформации (материал не упрочняется); *II* – область условной «полугорячей» деформации; *III* – область холодной деформации

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 β(Sb)-твердого раствора и эвтектики β(Sb)+α(Sb), кроме этого при наличии в сплаве меди образуются кристаллы химического соединения Cu_2Sb. Мягкой основой сплава является свинец, роль твердой составляющей выполняют частицы β(Sb)-фазы и химического соединения Cu_2Sb.

Свинец марок С1, С2, С3 имеет следующие характеристики механических свойств: временное сопротивление $\sigma_в$ =

= 19,6…24,5 МПа, относительное удлинение δ = 45…50 %.

На рис. 6.8 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.

6.4. Черные металлы

Группу черных металлов составляют стали и металлокерамические твердые сплавы.

Стали более дешевы и менее дефицитны, чем латуни, и поэтому широко применяются в отечественном патронном производстве по следующим направлениям:

1) малоуглеродистые (до 0,13 %) конструкционные качественные (11кп) и нестареющие повышенного качества (11ЮА) – для изготовления металлических элементов патрона типа оболочек и для изготовления биметалла 3;

2) конструкционные качественные (18кп) и нестареющие повышенного качества (18ЮА) с увеличенным содержанием углерода (до 0,22…0,25%) – для изготовления гильз и биметалла 1;

3) конструкционные качественные со средним содержанием углерода (до 0,65%) – для изготовления небронебойных сердечников;

4) инструментальные углеродистые – 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. 6.7.

Таблица 6.7

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…	0,20…	0,02…	0,13	0,025	0,025	0,20	0,25	0,20

18кп	1050-74	0,22 0,12… 0,20	0,40 0,30… 0,50	0,07 —	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. 6.9). 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 объемноцентрированного куба (ОЦК) с параметром a = 2,86 Å; при температурах от 910°C до 1390°C $Fe-\gamma$, имеющей строение атомной кристаллической решетки в виде гранецентрированного куба (ГЦК) с параметром a = 3,63 Å. 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 $Fe-\alpha$, но с несколько большим периодом решетки a = 2,93 Å (при 1425°C).

При переходе $Fe-\alpha \rightarrow Fe-\gamma$ наблюдается уменьшение объема, а при переходе $Fe-\gamma \rightarrow Fe-\alpha$ – увеличение.

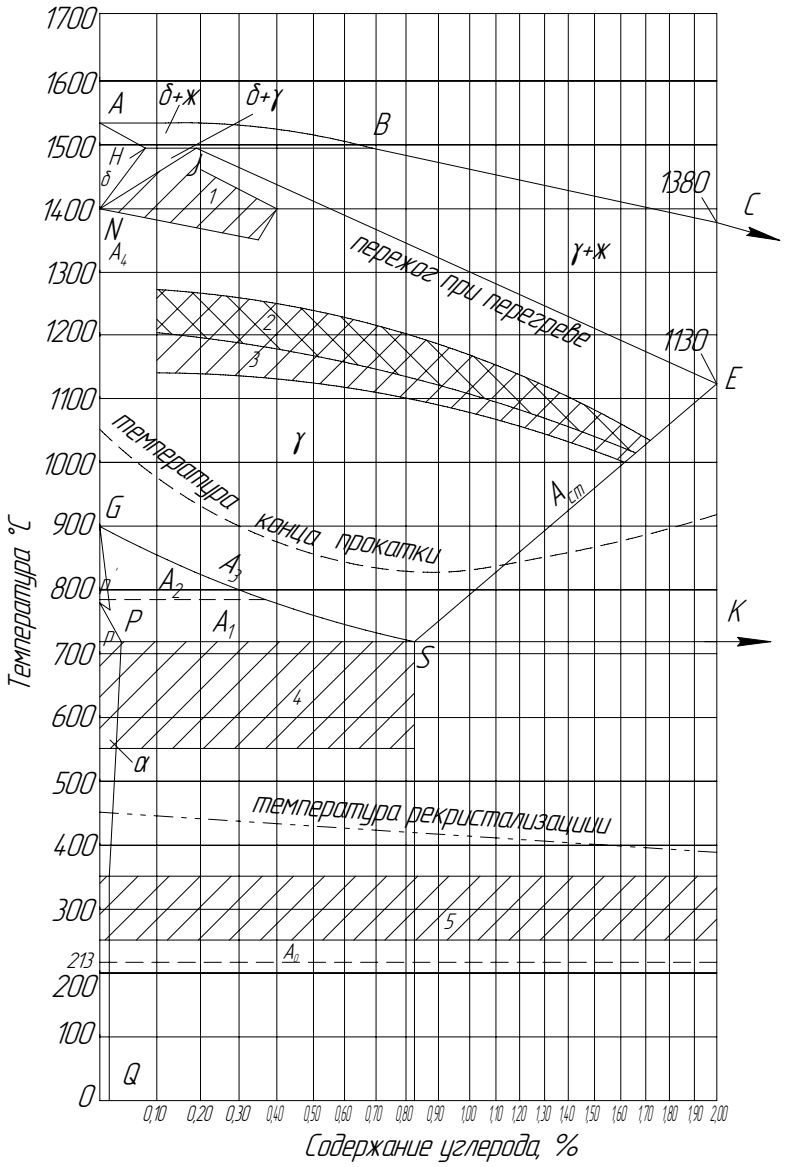


Рис. 6.9. Диаграмма состояния железо–углерод с областями характерных температур: *1* – кузнечной сварки; *2* – нагрева стали для прокатки; *3* – начала прокатки; *4* – субкритической горячей обработки давлением; *5* – синеломкости (дисперсионного твердения)

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 Å, а между отдельными слоями 3,40 Å.

В системе сплава Fe-C, согласно диаграмме состояния, фазами являются жидкий раствор углерода в железе; графит (C); цементит (Fe_3C); твердый раствор углерода в $Fe-\alpha$ (феррит); твердый раствор углерода в $Fe-\gamma$ (аустенит); твердый раствор углерода в $Fe-\delta$.

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).

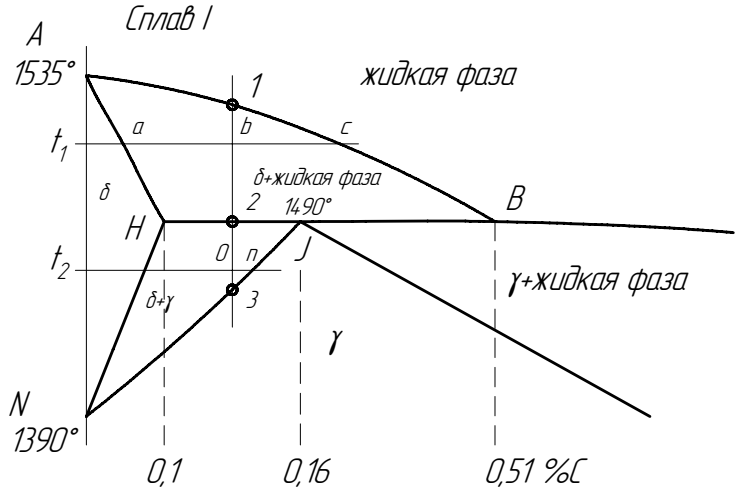
Цементит – упорядоченный твердый раствор углерода в железе с присущим ему относительно большим постоянством состава. Упаковка атомов в решетке цементита (решетка цементита орторомбическая) и расстояния между атомами весьма сходны с теми, которые наблюдаются в твердом растворе углерода в железе – γ.

В твердом растворе углерода в $Fe-\alpha$ 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˚C.

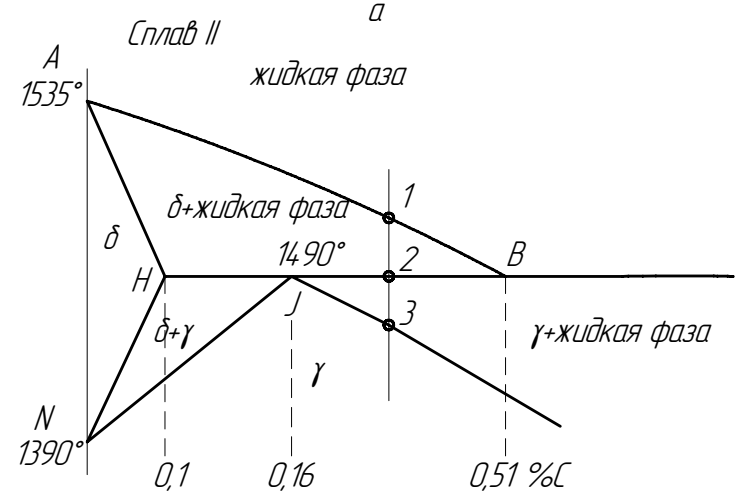
Весьма важным свойством $Fe-\gamma$ является значительно большая растворимость углерода (до 1,7 % C при 1145°C). Углерод в твердом растворе $Fe-\gamma$ находится в атомарном виде, независимо от того, с цементитом или с графитом образована система. Железо $Fe-\delta$ растворяет в себе углерод в незначительных количествах

(до 0,10 % при 1490°С).

На рис. 6.10 показаны схемы первичной и вторичной кристаллизации сплавов с различным содержанием углерода.



а



б

Рис. 6.10. 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% 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°C 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 – из двух: δ-твердого раствора точки *H* и аустенита состава т. *J*.

В интервале температур от т. *2* (1490°C) 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* (см. рис. 6.5). Ввиду того, что образующийся $Fe-\alpha$ (феррит) обладает малой растворимостью углерода, в оставшихся при этом порциях аустенита концентрация углерода должна повышаться (до 0,83 %). Вторичная кристаллизация завершается эвтектоидным распадом последних порций аустенита, с концентрацией углерода в 0,83 % при постоянной температуре 723°C 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 испыты-

вать никаких фазовых превращений, за исключением выделения цементита из феррита по линии *PQ* (см. рис. 6.9), 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. 6.6) вторичная кристаллизация протекает аналогично сплаву *1*, некоторые различия наблюдаются при протекании первичной кристаллизации. В отличие от первого сплава перитектическое превращение заканчивается тем, что δ-твердый раствор уйдет из системы, а останутся вновь образованная твердая фаз – аустенит состава т. *J* и неполностью израсходованная жидкая фаза состава т. *B*.

В т. *3* состав полностью кристаллизуется и будет находиться в состоянии аустенита. На рис. 6.11 показана микроструктура доэвтектоидной стали (11ЮА), которая состоит из равноосных зерен феррита и равномерно распределенного зернистого или сорбитообразного перлита.

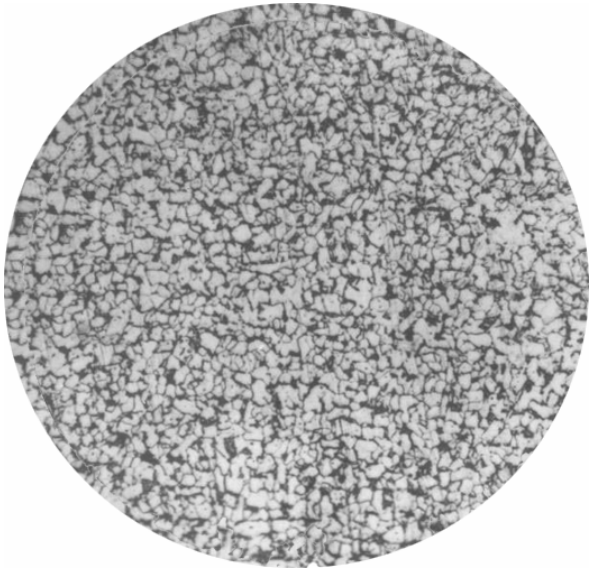


Рис. 6.11. Микроструктура доэвтектоидной стали 18 ЮА

В табл. 6.8 приведены нормируемые стандартами механические свойства сталей первых двух групп, в табл. 6.9 – справочные

данные по физико-механическим свойствам сталей 3-й и 4-й групп.

На рис. 6.12–6.14 показаны зависимости механических свойств сталей 11кп, 11ЮА и 18ЮА от степени деформации и диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$. В результате исследований с использованием активного планируемого эксперимента получены однофакторные и многофакторные модели характеристик механических свойств.

Таблица 6.8

Механические свойства углеродистых сталей первой и второй групп

Марка стали	Состояние поставки			ГОСТ	$\sigma_в$, МПа (кгс/мм^2)	δ_{10}, % не менее
	Вид	Толщина проката, мм	Термообработка			
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	803-81 806-76	304…397 (31…40,5)	28,5
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

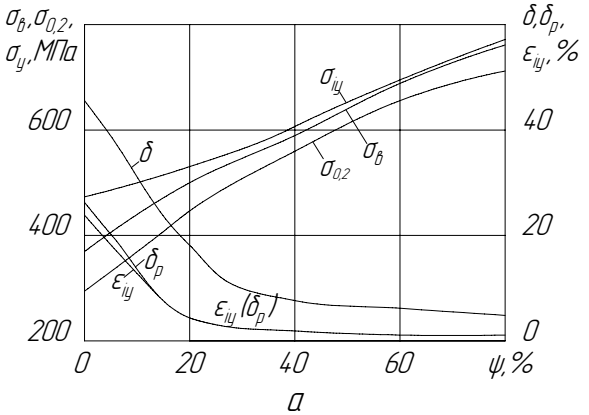


Рис. 6.12. Зависимость характеристик механических свойств стали 11ЮА (*а*) и 18ЮА (*б*) от степени деформации

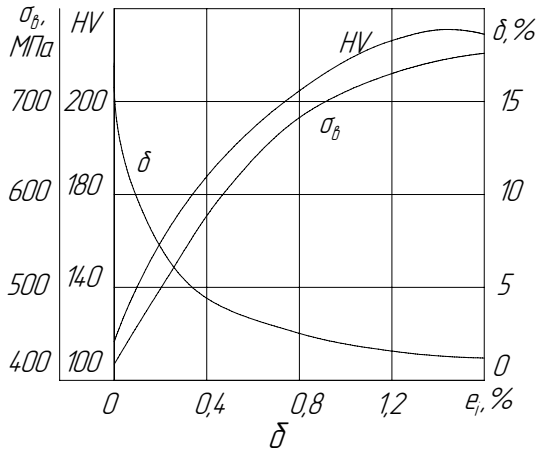


Рис. 6.12 (окончание)

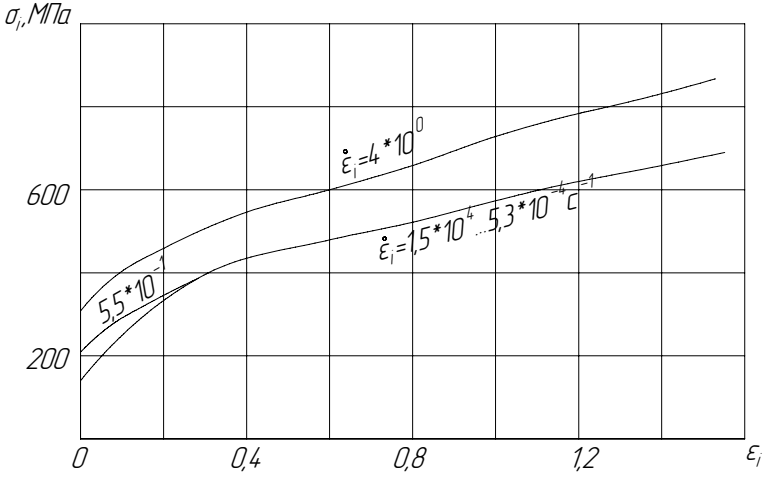
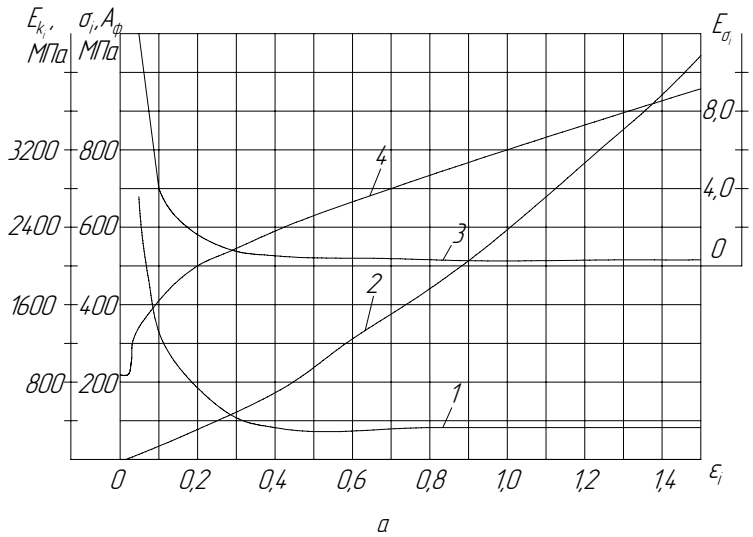


Рис. 6.13. Диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ для стали 11кп при различных скоростях деформации



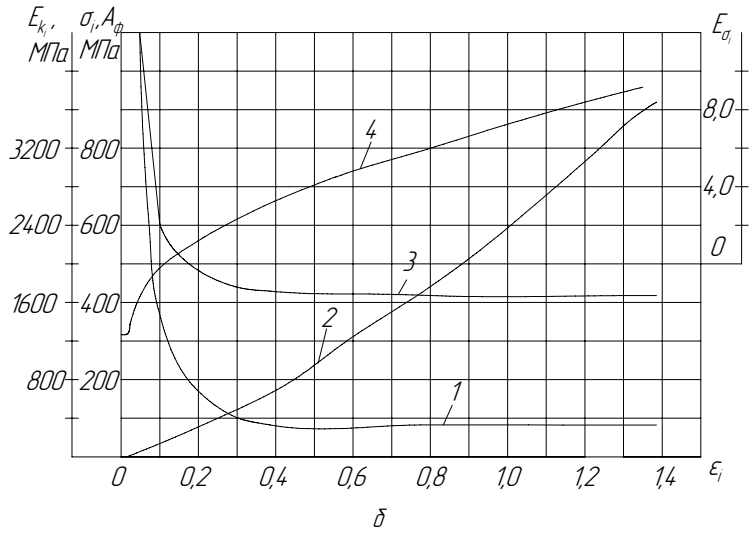


Рис. 6.14. Зависимость характеристик механических свойств стали 18ЮА от степени деформации: *а* – S_0=3,1 мм; *б* – S_0=8,7 мм; *1* – абсолютный модуль пластичности $E_{кi}$; *2* – удельная работа формоизменения $A_ф$; *3* – относительный модуль пластичности $E_{\sigma i}$; *4* – интенсивность напряжений σ_i

Таблица 6.9

Физико-механические свойства сталей третьей и четвертой групп

Марка стали	Температура критических точек, °С		Плотность, г/см^3	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	*HB*	$a_к$	*E*
	$\frac{AC_1}{Ar_1}$	$\frac{AC_3}{Ar_3}$		МПа (кгс/мм^2)		%		МПа (кгс/мм^2)		
Ст 10	$\frac{732}{680}$	$\frac{874}{854}$	7,83	340 (34)	210 (21)	31	55	1370 (137)	—	198000 (19800)
Ст 15	$\frac{735}{685}$	$\frac{863}{840}$	7,82	360 (36)	230 (23)	29	55	1430 (143)	65 (6,5)	202000 (20200)
Ст 20	$\frac{735}{682}$	$\frac{854}{835}$	7,82	420 (42)	250 (25)	25	55	1560 (156)	55 (5,5)	200000 (20000)
Ст 25	$\frac{735}{685}$	$\frac{850}{835}$	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	420	11	35	—	—	—

				(71)	(42)					
У10А	$\frac{730}{700}$	$\frac{800}{750}$	7,81	550-650 (55-65)	250-350 (25-35)	—	55-65	1970 (197)	—	—
У12А	$\frac{730}{700}$	$\frac{820}{750}$	7,81	600-700 (60-70)	350-450 (35-45)	—	45-55	2070 (207)	—	—

Однофакторные модели, учитывающие влияние степени деформации (e_i или ψ):

• для стали 11кп ($e_i = 0…1,4$)

$\sigma_в = 32 + 49\, e_i - 19,2\, e_i^2$, кгс/мм^2;

$HV = 105 + 135\, e_i - 36,4\, e_i^2$;

$\delta = 2,8 - 3,9 \ln e_i$;

$\frac{\sigma_в}{\sigma_{в0}} = 1 + 1,53 e_i - 0,6\, e_i^2$ – в безразмерном виде;

$\frac{HV}{HV_0} = 1 + 1,29 e_i - 0,35\, e_i^2$;

• для стали 11ЮА ($\psi = 0…80$ %)

$\sigma_в = 38 + 0,61\psi - 0,002\psi^2$, кгс/мм^2;

$\delta_1 = 45 - 1,33\psi$ ($\psi = 0…20$ %);

$\delta_2 = 3,7 \exp 31,96/\psi$ ($\psi = 20…80$ %);

$\frac{\sigma_в}{\sigma_{в0}} = 1 + 0,016\psi - 0,00005\psi^2$ – 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;

$HV = 126 + 173,3 e_i - 63,4\, e_i^2$;

$\delta = 2,1 - 2,6 \ln e_i$;

$\frac{\sigma_в}{\sigma_{в0}} = 1,0 + 1,07 e_i - 0,37\, e_i^2$ – в безразмерном виде,

где $\sigma_{в0}$, HV_0 – свойства металла в отожженном состоянии.

Многофакторные модели, учитывающие влияние степени деформации e_i (ψ_i); температуры t и длительности τ последующего отжига:

• для стали 11кп (e_i = 0,2…1,2, ψ= 20…80 %, $t = \frac{t_{отж}}{100}$ = 2…9,5; τ = 30…90 мин, $e_i = 1{,}15 \ln \frac{1}{1-\psi}$)

$\sigma_в = 45 + 49{,}5e_i - 5{,}03t - 4{,}3e_it - 0{,}56e_i\tau - 9{,}42e_i^2 + 0{,}44t^2$, кгс/мм^2;

$HV = 148 + 170e_i - 15{,}8t - 12{,}3e_it - 3{,}62e_i\tau - 31{,}48e_i^2 + 1{,}21t^2$;

$\delta = 9{,}9 - 27{,}1e_i + 9{,}8t - 4{,}56\tau + 1{,}54e_it + 1{,}9e_i^2 - 0{,}73t^2 + 0{,}28\tau^2$;

$\frac{\sigma_в}{\sigma_{в0}} = 1{,}41 + 1{,}55e_i - 0{,}16t - 0{,}13e_it - 0{,}0175e_i\tau - 0{,}29e_i^2 + 0{,}014t^2$ – в безразмерном виде;

$\frac{HV}{HV_0} = 1{,}41 + 1{,}62e_i - 0{,}15t - 0{,}12e_it - 0{,}034e_i\tau - 0{,}30e_i^2 + 0{,}012t^2$.

• для стали 11ЮА (ψ = 20…80 %, $t = \frac{t_{отж}}{100}$ = 2…7,0, τ = = 30…90 мин)

$\sigma_в = 18{,}4 + 0{,}35\psi + 0{,}004\psi t - 0{,}0002\tau^2 + 11{,}8t^2 - 3{,}32t^3 + 0{,}024t^4$, кгс/мм^2;

$\frac{\sigma_в}{\sigma_{в0}} = 0{,}48 + 0{,}014\psi + 1{,}05\cdot10^{-4}\psi t - 5{,}3\cdot10^5\tau^2 + 0{,}31t^2 - 8{,}7\cdot10^{-2}t^3 + 6{,}310^{-3}t^4$ – в безразмерном виде;

$\delta = 30 - 0{,}0045\psi\tau + 0{,}0487\psi t + 0{,}002\tau^2 - 9{,}49t^2 + 2{,}8777t^3 - 0{,}2162t^4$;

• для стали 18ЮА (e_i= 0,2…1,6; $t = \frac{t_{отж}}{100}$ = 2…9, τ = = 30…90 мин)

$\sigma_в = 59 + 49{,}9e_i - 6{,}1t + 0{,}22\tau - 3{,}04e_it - 0{,}22e_i\tau - 0{,}012t\tau - 6{,}47e_i^2 + 0{,}38t^2$, кгс/мм^2;

$HV = 222 + 96{,}3e_i - 13{,}2t - 0{,}41\tau - 7{,}64e_it - 0{,}59e_i\tau + 0{,}043t\tau + 0{,}005\tau^2$;

$\delta = -4{,}5 - 13{,}6e_i + 6{,}1t - 0{,}09\tau + 1{,}31e_it + 0{,}14e_i\tau - 0{,}27t^2$;

$\frac{\sigma_в}{\sigma_{в0}} = 1{,}38 + 1{,}17e_i - 0{,}14t + 5{,}2\cdot10^{-3}\tau - 0{,}017e_it - 5{,}2\cdot10^{-3}e_i\tau -$

$-2{,}8\cdot10^{-4}t\tau - 0{,}15\,e_i^2 + 8{,}9\cdot10^{-3}t^2 -$ в безразмерном виде;

$$\frac{HV}{HV_0} = 1{,}76 + 0{,}76e_i - 0{,}10t - 3{,}3\cdot10^{-3}\tau - 0{,}06e_it - 4{,}6\cdot10^{-3}e_i\tau +$$
$$+3{,}4\cdot10^{-4}t\tau + 4\cdot10^{-5}t^2.$$

Для повышения бронепробиваемости бронебойные сердечники могут изготавливаться из металлокерамических твердых сплавов, основу которых составляет порошкообразный карбид вольфрама с добавкой 4…6 % порошкообразного кобальта или никеля. Плотность сплава типа 1 14,8…15,0 г/см^3, твердость бронебойных сердечников 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 (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 приведен в табл. 6.10, а механические свойства сплавов с различным содержанием кобальта – в табл. 6.11.

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), $E = 6{,}75\cdot10^{-6}$ МПа, $a_к$ = 0,87 кДж/м^2 (ненадрезанные образцы), $a_к$ = 0,08 кДж/м^2 (надрезанные образцы).

Таблица 6.10

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 6.11

Механические свойства сплавов WC-Co при одноосном сжатии (по данным Г.С. Креймера)

Содержание кобальта, %	Условный предел текучести, МПа (кгс/мм^2)	Максимальная деформация до разрушения, % (при напряжении кгс/мм^2)	Предел прочности, МПа (кгс/мм^2)
6	2000 (200)	1,10 (337)	3550 (355)
15	1300 (130)	1,49 (270)	2900 (290)
25	890 (89)	4,35 (240)	2550 (255)
35	650 (65)	5,10 (200)	2250 (225)
50	460 (46)	6,86 (180)	2070 (207)

6.5. Биметаллы

Биметалл ("би" от лат. bis – дважды) – материал, состоящий из двух прочно соединенных слоев разнородных металлов или сплавов. Биметаллы применяют с целью экономии дорогостоящих и дефицитных металлов и (или) получения материала, сочетающего некоторые свойства исходных металлов.

В патронном производстве биметаллы (биметалл 1 и биметалл 3) заменяют дорогостоящие и дефицитные сплавы латуни (Л68 и Л70), в то же время не уступают им по основным эксплуатационным требованиям (жесткости, прочности, устойчивости против коррозии, антифрикционным свойствам) и имеют относительно высокие технологические свойства (штампуемость, упрочняемость и некоторые другие).

Биметаллы изготавливают плакированием, т. е. нанесением на поверхность стальных полос тонкого слоя томпака – латуни Л90 в процессе совместной горячей прокатки стальной заготовки и покрывающих 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 в виде полос изготавливают из стали марки 18кп с химическими составом по ГОСТ 1050 или 18ЮА с химическим составом по ГОСТ 803 и томпака марки Л90 по ГОСТ 15527.

Биметалл 3 в виде лент и полос изготавливают из стали марки 11кп с химическим составом по ГОСТ 1050 или 11ЮА по ГОСТ 803 и томпака марки Л90. Полосы из биметалла 1 поставляют в отожженном состоянии, ленты и полосы из биметалла 3 – в отожженном 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 даны в табл. 6.12.

Таблица 6.12

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. 6.13 и на рис. 6.15, 6.16 приведены механические свойства биметалла по результатам исследований авторов.

Таблица 6.13

Механические свойства биметаллов

Марка материала	$\sigma_т$	$\sigma_в$	σ_{iy}	$S_к$	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

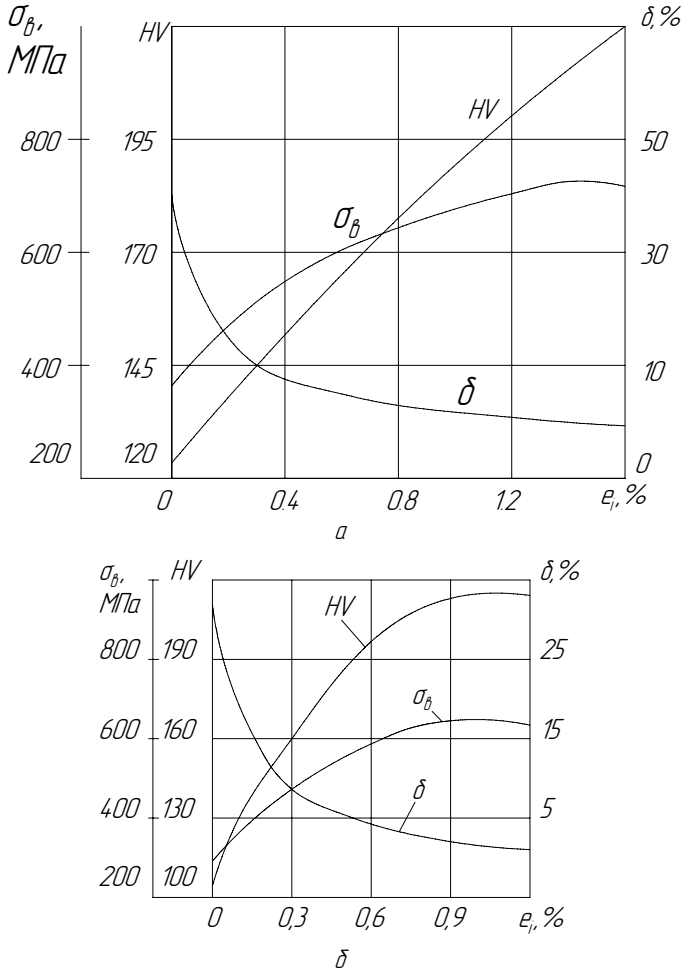


Рис. 6.15. Зависимость характеристик механических свойств биметалла 1 (*а*) и биметалла 3 (*б*) от степени деформации

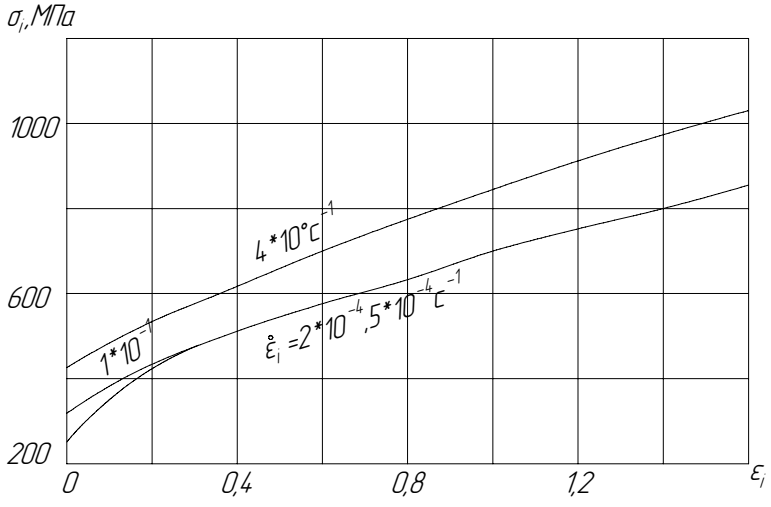


Рис. 6.16. Диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ для биметалла 3 при различных скоростях деформации

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:

• однофакторные для биметалла 1 ($e_i = 0,2\ldots1,6$)

$\sigma_в = 37,7 + 47,3e_i - 16,3\,e_i^2$, кгс/мм^2;

$HV = 124 + 90,3\,e_i - 18,9\,e_i^2$;

$\delta = 0,8 - 5,1\ln e_i$;

$\dfrac{\sigma_в}{\sigma_{в0}} = 1 + 1,25\,e_i - 0,34\,e_i^2$ – в безразмерном виде;

$\dfrac{HV}{HV_0} = 1 + 0,73\,e_i - 0,15\,e_i^2$;

• однофакторные для биметалла 3 ($e_i = 0\ldots1,2$)

$\sigma_в = 30,3 + 68,2\,e_i - 33,6\,e_i^2$, кгс/мм^2;

$HV = 108 + 204\,e_i - 101,5\,e_i^2$;

$\delta = 2,0 - 4,4\ln e_i$;

$$\frac{\sigma_в}{\sigma_{в0}} = 1 + 2{,}25e_i - 1{,}11\, e_i^2$$ – в безразмерном виде;

$$\frac{HV}{HV_0} = 1 + 1{,}9\, e_i - 0{,}94\, e_i^2\,;$$

- многофакторные для биметалла 1 (e_i = 0,2…1,6, $t = \frac{t_{отж}}{100} =$ = 2…9,5; τ = 30…90 мин)

$\sigma_в = 54 + 45{,}4e_i - 7{,}9\, t + 0{,}18\tau - 2{,}73e_it - 0{,}23\, e_i\, \tau - 5{,}78\, e_i^2 + 0{,}49\, t^2$, кгс/мм^2;

$HV = 157 + 131{,}5e_i - 11{,}7t - 8{,}33e_it - 0{,}52e_i\tau - 0{,}012t\tau - 15{,}37\, e_i^2 + 0{,}56\, t^2 + 0{,}0028\tau^2$;

$$\frac{\sigma_в}{\sigma_{в0}} = 1{,}43 + 1{,}20\, e_i - 0{,}21t + 4{,}8\cdot10^{-3}\tau - 7{,}2\cdot10^{-2}\, e_i\, t - 6{,}1\cdot10^{-3}\, e_i\, \tau - 0{,}15\, e_i^2 + +1{,}3\cdot10^{-2}\, t^2$$ – в безразмерном виде;

$$\frac{HV}{HV_0} = 1{,}27 + 1{,}06\, e_i - 9{,}4\cdot10^{-2}\, t - 6{,}7\cdot10^{-2}\, e_i\, t - 4{,}2\cdot10^{-3}\, e_i\, \tau - 9{,}7\cdot10^{-5}\, t\tau - 0{,}12\, e_i^2 + 4{,}5\cdot10^{-3}\, t^2 + 2{,}3\cdot10^{-5}\tau^2;$$

- многофакторные для биметалла 3 (e_i = 0,2…1,2, $t = \frac{t_{отж}}{100} =$ = 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;

$HV = 119 + 185{,}5\, e_i - 12{,}9\, t + 1{,}26\tau - 11{,}12\, e_it - 0{,}86e_i\tau - 36{,}002\, e_i^2 + 0{,}42\, t^2 - 0{,}006\tau^2$;

$$\frac{\sigma_в}{\sigma_{в0}} = 1{,}42 + 1{,}49\, e_i - 0{,}17t + 6{,}3\cdot10^{-3}\tau - 0{,}11\, e_i\, t - 8{,}9\cdot10^{-3}\, e_i\, \tau - 1{,}32\cdot10^{-4}t\tau - 6{,}9\cdot10^{-2}\, e_i^2 + 9{,}6\cdot10^{-3}\, t^2$$ – в безразмерном виде;

$$\frac{HV}{HV_0} = 1{,}10 + 1{,}72\, e_i - 0{,}12\, t + 1{,}17\cdot10^{-2}\tau - 0{,}10\, e_i\, t - 7{,}96\cdot10^{-3}\, e_i\tau - 0{,}33\, e_i^2 + 3{,}9\cdot10^{-3}\, t^2 - 5{,}6\cdot10^{-3}\tau^2.$$

Стандартами регламентированы размерные ряды полос и лент по толщине и ширине.

Примеры условного обозначения полос и лент из биметаллов:

Полоса $\dfrac{2{,}1\times116\times750-2000\ \text{Биметалл}\ 1\ \text{ОСТ...}}{18\ \text{ЮА}\ \ \text{ГОСТ}803-81}$;

Лента $\dfrac{1{,}37\times131\ \text{Биметалл}\ 3\ \text{ОСТ...}}{11\ \text{ЮА}\ \ \text{ГОСТ}803-81}$.

6.6. Контроль качества исходного материала и штампованных полуфабрикатов

6.6.1. Методы контроля

Для получения высокого качества патронов и их элементов 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, 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 следующие:

1) прочностные, обеспечивающие сопротивление разрушению и жесткость изделий в обращении и эксплуатации;

2) упругие, обеспечивающие условия надежной экстракции элементов патрона;

3) пластические, 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, ее микро- и макроструктурой, 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 пороков металла исходной заготовки (дефектоскопию).

Контроль устойчивости против старения, коррозии и коррозионного растрескивания проводится, как правило, на завершающей стадии производства, после получения готовых изделий.

Окончательный контроль эксплуатационных свойств материалов осуществляется методами натурных полигонных испытаний. Основными контролируемыми технологическими свойствами являются штампуемость, способность к удержанию наносимых на его поверхность антикоррозионных покрытий и другие.

Штампуемость – 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 НДС, схеме напряженного состояния, условиях контактного трения). В соответствии с изложенными в подразд. 3.3 представлениями о феноменологической модели предельных состоянии металлов при пластической деформации, важнейшими технологическими свойствами являются характеристики предельных k–состояний (k = 1, 2, 3, 4): предельные степени деформации – до начала текучести (e_{i1}), до потери устойчивости пластического формоизменения ($e_{i2} = e_{iy}$), до предразрушения ($e_{i3} = e_{iн}$), до разрушения ($e_{i4} = e_{iр}$) – и отвечающие им характеристические значения сопротивления материала деформированию σ_{ik}; удельная работа формоизменения $A_{удk}$, безразмерные параметры деформационного упрочнения $E_{\sigma_{ik}}$ и степень использования запаса пластичности ω_{ik}.

Сложность определения технологических свойств металлов заключается в том, что каждая из перечисленных характеристик предельной деформации e_{ik} и в целом штампуемость материала

зависит от трех групп параметров: 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 ОПД и возникновению сосредоточенного утонения, волнистости, накоплению трещин и другим нежелательным локальным явлениям. Это приводит 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 предельного состояния (см. подразд. 3.3), которое сопровождается качественными необратимыми изменениями металла и 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 не материала заготовки, а материала 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. $\frac{e_{i\,\text{доп}}}{e_{i\,\text{пр}}} < 1$

или

$$e_{i\text{доп}} = C\, e_{i\text{пр}}, \qquad (6.1)$$

где $C < 1$ – коэффициент запаса пластичности (устойчивости).

В соотношении (6.1) C – неопределенная величина. Любое заданное его значение не гарантирует 100%-ное исключение технологического отказа, так как важнейшим свойством реальных процессов является рассеяние их характеристик.

Причиной рассеяния является то, что на результаты измерения и формирования характеристик 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 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 оценке 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 однозначно определены. Но они не являются и произвольными. Имея достаточный объем данных, используя теорию вероятности и методы математической статистики, можно оценить предельную и допустимую степень деформации в процессах штамповки с учетом случайной природы этих величин. Исследования подтверждают, 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:

$$e_{i\,\text{пр}} = \bar{e}_{i\,\text{пр}} \pm 3\bar{S}_{ei} = \bar{e}_{i\,\text{пр}}(1 \pm 3V_{ei}); \qquad (6.2а)$$

$$e_{i_{\text{доп}}} = \bar{e}_{i_{\text{пр}}} - 3\bar{S}_{ei} = \bar{e}_{i_{\text{пр}}}(1 - 3V_{ei}), \qquad (6.2б)$$

где $\bar{e}_{i_{\text{пр}}}$ – среднее арифметическое выборки; $\bar{S}_{ei}$ – среднее квадратическое отклонение выборки; $V_{ei} = \dfrac{\bar{S}_{ei}}{\bar{e}_{i_{\text{пр}}}}$ – коэффициент вариации.

Путем сравнения (6.2) и (6.1) устанавливаем, что коэффициент запаса принимает значение: $C = 1 - 3V_{ei}$.

В соответствии с выполненными статистическими исследованиями можно принимать, например, следующие числовые значения коэффициента вариации в выражении (6.2):

- 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.

В качестве меры предельных деформаций используем рассмотренное выше понятие о конечной деформации, введенное А.А. Ильюшиным и Г.А. Смирновым-Аляевым, предполагающее допущения об однородности и монотонности процесса пластической деформации.

Сложность определения технологических свойств оправдывает практику выявления пригодности материалов методом натурных испытаний, т. е. на самих технологических процессах. В соответствии с рассмотренными положениями методы контроля технологических свойств материалов исходных заготовок и полуфабрикатов включали в себя химический, металлографический анализ, дефектоскопию, механические испытания, технологические испытания и пробы, натурные испытания.

6.6.2. 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: хром, никель, медь и алюминий.

Каждый из элементов определенным образом влияет на свойства металла.

Оптимальное содержание углерода в штампуемых сталях 0,05-0,22%, более низкое (<0,05%) нежелательно из-за опасности газонасыщения и увеличения склонности к росту зерна, более высокое увеличивает сопротивление деформированию и ухудшает пластические свойства стали.

Из газов наиболее вредное влияние на сталь оказывают азот и кислород: усиливают 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 должны иметь азота не 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 трещин при холодной штамповке.

В последнее время установлено, что марганец увеличивает способность к глубокой вытяжке. Для достижения высоких вытяжных свойств его содержание 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 содержания марганца (0,50 %), иначе ухудшаются условия кипения стали в изложнице и повышается сопротивление деформированию материала.

Оптимальное содержание кремния в стали 0,06-0,13 %, так как она должна обладать не только высокой способностью к штампуемости, но и определенной жесткостью.

Сера и фосфор – нежелательные элементы 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 превы-

шать 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 стали 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 медноцинковых сплавов (латуни) должен соответствовать нормам, указанным в ГОСТах. Наиболее целесообразной маркой для гильз, как установлено ранее, является сплав с содержанием цинка от 33 до 28 %.

Помимо цинка, на качество латуни влияют неизбежные примеси, из которых наиболее вредны следующие:

1) висмут (сообщает хрупкость латуни в холодном и горячем состоянии) – не более 0,002 %;

2) сурьма (снижает пластичность в холодном состоянии) – не более 0,002 %;

3) железо (снижает пластичность и сообщает хрупкость) – не более 0,1 %;

4) сера (сообщает пузыристость при отливке) – не более 0,002 %.

На заводе-изготовителе для проверки химического состава прокатанных готовых стальных и биметаллических полос отбирают контрольные полосы.

При сифонной разливке стали отбирают по одной из полос, изготовленных из слитков первого и последнего сифонов, при разливке сверху – 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 18кп 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 биметалличе-

ских полос отбирают две полосы каждой поставляемой 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 стали 11кп и 18ЮА проверяют содержание алюминия. Содержание углерода и серы определяют методом сжигания, фосфора – калориметрическим методом, остальных элементов – 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 обнаружится 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 существенно влияет на механические свойства, качество поверхности материала и качество штамповки. Металлографический анализ позволяет 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 благоприятны пластинчатый перлит или крупные выделения 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. По перлиту микроструктура должна соответствовать шкале 2 ГОСТ 5640–68, допустимые баллы 0–3 ряда Б (см. рис. 6.6).

Микроструктура исходного материала должна содержать минимальное количество неметаллических включений, которые способствуют возникновению трещин при штамповке. Строчные оксиды и сульфиды не должны превышать трех баллов по шкалам ГОСТ 1778–62.

Микроструктура латуней должна быть мелкозернистой, в противном случае поверхность колпачков получается шероховатой. Крупнозернистая латунь может самопроизвольно растрескиваться 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 более 100 т. Для проверки микроструктуры и неметаллических включений биметаллических полос вырезают по два темплета от двух полос каждого отжига поставляемой плавки. Неметаллические включения стального слоя полос определяют на полированных шлифах при 100-кратном увеличении. Место вырезки образцов для проверки должно находиться от кромок на расстоянии не менее чем 1/3 ширины полосы. Оценку микроструктуры стального слоя полос по форме перлита производят при 400-кратном увеличении, оценку полосчатости – при 100-кратном.

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 между изготовителем и потребителем.

Исследование макроструктуры позволяет обнаружить в металле волокнистость, усадочные раковины, рыхлости, пустоты, трещины, шлаковые включения, а также установить наличие разрывов и начавшихся трещин.

6.6.3. Контроль качества исходного материала и полуфабрикатов на наличие дефектов и по размерам

При изготовлении листового проката встречаются следующие дефекты:

– внутренние (раковины, подкорковые пузыри, заворот корки,

внутренние продольные и поперечные трещины, расслоения, пористость, плены, неметаллические включения);

– наружные (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 характеристики и причины появления дефектов металлургического производства:

1) усадочные раковины – местные углубления, образующиеся на поверхности полосы или ленты в результате вскрытия мелких пустот (или аналогичные углубления); появляются при вдавливании в металл окалины, налипшей к валкам правильной машины;

2) подкорковые пузыри – различной величины и формы вздутия на поверхности листа и полосы; образуются из не заварившихся в процессе горячей прокатки пузырей;

3) заворот корки – следствие относительно медленной и холодной разливки металла; обычно сопровождается газовыми пузырями;

4) волосовины – мелкие трещины на поверхности металла различной протяжности и глубины, вытянутые вдоль прокатки; появляются в результате вскрытия и вытягивания в процессе прокатки подкорковых пузырей и неметаллических включений;

5) плены – тонкие, чешуйчатые, окисленные пластинки металла, отслаивающиеся от поверхности полосы или листа;

6) внутренние продольные и поперечные трещины – результат неравномерного или быстрого нагрева и перегрева металла; причина – пониженная пластичность металла.

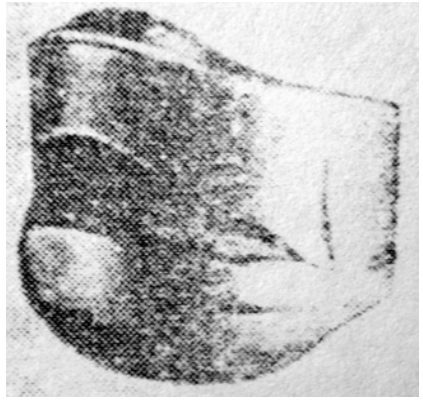
Все эти дефекты порождают брак в процессе производства. Весьма опасным дефектом, особенно для стальных и биметаллических полос, являются царапины на их поверхности – одна из основных причин, вызывающих появление трещин по корпусу гильзы, демонтаж пуль.

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, приво-

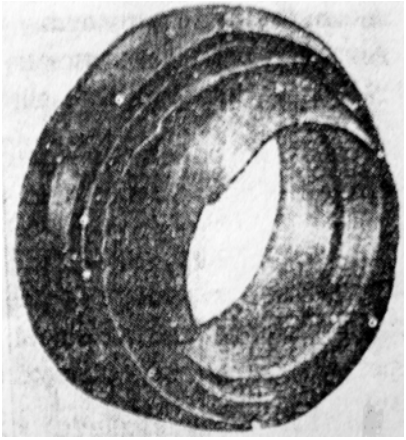
дят к нарушению нормальной работы механизмов подачи и просечкам, что дает некачественный колпачок, понижает стойкость сверточного, вытяжного инструмента.

Использование металла с расслоениями порождает брак в процессе производства, обнаруживаемый иногда только в момент стрельбы, поломку инструмента и оборудования.

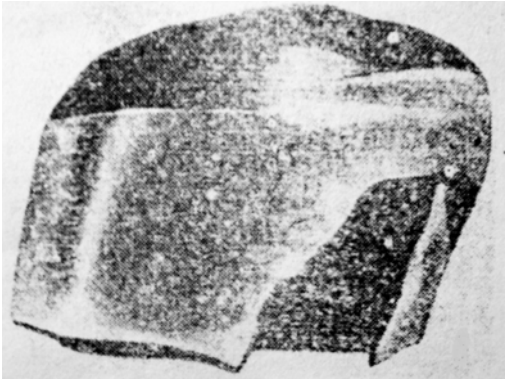
На рис. 6.17, *а* и *б* показан брак вследствие расслоения металла при свертке в колпачке. В одном случае получился кольцевой надрыв, что привело к изгибу и поломке пуансона, в другом – обрыв части колпачка и поломка пуансона.



а



в



б

Рис. 6.17. 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

На рис. 6.17, *в* показан отрыв (пробивка) дна. В процессе свертки колпачка происходит сдвиг одной части металла относительно другой. Более опасны случаи, когда расслоение выявляется не на первичных операциях, а только при стрельбе

Не менее опасны плены и свищи. Примеры брака вследствие этих дефектов показаны на рис. 6.18. 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 произойдет прорыв, выпучивание металла, а иногда и отрыв части гильзы.

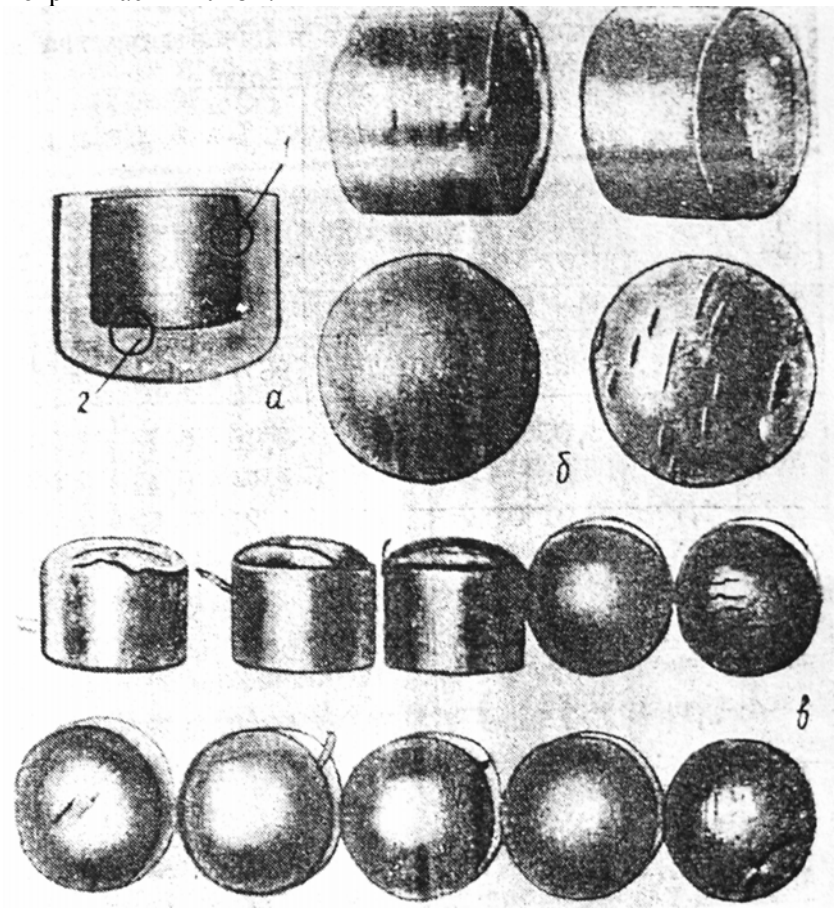


Рис. 6.18. Виды брака после свертки по пленам и свищам: *а* – плены на внутренней поверхности; *б* – плены на наружной поверхности; *в* – отслоение части металла

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. 6.13 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.

Таблица 6.13

Брак 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. невооруженным глазом. Наружная поверхность полос должна быть чистой, ровной и гладкой. На ней не допускаются раковины, плены, трещины, грубая рябизна, глубокие царапины, надрывы и рванины на боковых кромках, неплотная приварка томпака для биметаллических 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 привело к разработке более совершенных методов визуального контроля. К ним 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 для патронно-гильзовых заводов известны следующие методы контроля:

1) адаптерный – для выявления продольных трещин на последних вытяжках;

2) оптический – для контроля всех видов дефектов на поверхности изделий;

3) феррозондовый – для контроля внутренних дефектов: раковин, пузырей;

4) токовихревой – для контроля наружных дефектов;

5) электромагнитный и некоторые другие методы.

Наружному осмотру и проверке размеров подвергают 100 % полос партии. Для обмера 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 неудобны в производстве, а более короткие увеличивают расход металла и снижают производительность при вырубке, так как снижается коэффициент использования пресса.

Прутки для сердечников обычных и бронебойных пуль осмат-

ривают 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 на полете.

6.6.4. Механические испытания

В патронном производстве применяются известные и стандартизованные методы испытания на растяжение плоских и цилиндрических образцов, изготовленных вырезкой из заготовок (полуфабрикатов) и деталей, и на твердость самих заготовок и 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 несложно по исполнению и обеспечивает получение большого числа характеристик механических свойств.

Кроме того, широкое применение в патронном производстве тонколистового материала исключает возможность испытаний на сжатие и кручение. Малые размеры полуфабрикатов и готовых изделий в большинстве случаев затрудняют применение для оценки их свойств обычного метода испытания – на растяжение плоских образцов, изготовленных из полуфабрикатов и деталей. В этом случае важное значение приобретают методы испытания кольцевых образцов на растяжение и на твердость.

Ограниченно применяется метод испытания на ударный изгиб специальных образцов, изготовленных из заготовок и полуфабрикатов (деталей), для определения ударной вязкости при обычных и пониженных температурах.

Определяемые механические свойства характеризуют качество исходного металла, его пригодность для эксплуатации металлических элементов патрона и делятся на три группы характеристик: характеристики сопротивления материала деформированию, характеристики пластичности и обобщенные характеристики. Последние являются функциями сопротивления деформированию и степени деформации.

Основные характеристики механических свойств, определяемые при испытаниях на растяжение, ударный изгиб и твердость, приведены в табл. 6.14.

Таблица 6.14

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	$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100\%$	Модуль нормальной упругости	$E = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}$
Предел пропорциональности	$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0}$	Относительное равномерное удлинение	$\delta_у = \frac{l_{kp} - l_{0р}}{l_{0р}} 100\%$	Модуль пластичности (интенсивность упрочнения)	$E_{кi} = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i}$
Предел текучести (физический)	$\sigma_т = \frac{P_т}{F_0}$	Относительное поперечное сужение после разрыва	$\psi = \frac{F_0 - F_к}{F_0} 100\%$	Удельная работа деформации	$A_{уд_i} = \int_0^{\varepsilon_i} \sigma_i d\varepsilon_i$
Предел текучести (условный)	$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}$	Относительное равномерное поперечное сужение	$\psi_у = \frac{F_0 - F_у}{F_0} 100\%$	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	$A = \int_{l_0}^{l} P dl$
Интенсивность напряжений в момент начала образования шейки на образце	$\sigma_{iy} = \frac{P_{max}}{F_у}$	Интенсивность деформации в момент образования шейки	$\varepsilon_{iy} = \ln \frac{l_у}{l_0} = 2 \ln \frac{d_0}{d_у}$	Относительный модуль пластичности	$E_{\sigma_i} = \frac{1}{\sigma_i} \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i}$

Продолжение табл. 6.14

1	2	3	4	5	6
Интенсивность напряжений	$\sigma_i = \frac{P_i}{F_i}$	Интенсивность деформации в момент разрушения	$\varepsilon_{i\text{р}} = 2\ln\frac{d_0}{d_\text{к}}$	–	–
Сопротивление разрушению	$S_\text{к} = \frac{P_\text{к}}{F_\text{к}}$	–	–	–	–
2. Ударный изгиб – определение ударной вязкости					
Ударная вязкость (при испытании хрупких материалов)	$a_\text{н} = \frac{A_\text{н}}{F}$	Угол загиба	α°	Работа разрушения	$A_\text{н} = Pl(\cos\beta - \cos\alpha)$
–	–	Угол излома	180°–α	Ударная вязкость	$a_\text{н} = \frac{A_\text{н}}{F}$
–	–	Стрела прогиба образца без надреза	–	–	–
–	–	Относительное удлинение растянутой стороны образца без надреза	$\delta = \frac{l_\text{к} - l_0}{l_0}100\%$	–	–
–	–	Истинная относительная деформация растянутой стороны образца без надреза	$\varepsilon_i = \ln\frac{l_r}{l_0}$	–	–
–	–	Ударная вязкость	$a_\text{н} = \frac{A_\text{н}}{F}$	–	–
3. Измерение твердости					
Твердость по Бринелю	$HB = \frac{P}{S_\text{в}}$	Диаметр отпечатка	d	–	–
Твердость по отпечатку конуса	$HR = \frac{P}{F}$	Площадь отпечатка	$F = \frac{\pi d^2}{4}$	–	–
	$HR = \frac{P}{S_\text{в}}$	Поверхность отпечатка	$S_B = \frac{D^2}{2} - \frac{\pi d^2}{2} \cdot \sqrt{D^2 - d^2}$	–	–

Окончание табл. 6.14

1	2	3	4	5	6
Твердость по отпечатку пирамиды (по Викерсу)	$HV = \frac{P}{S_П}$	Глубина отпечатка	$h = \frac{D}{2} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{D^2 - \left(d^1\right)^2}$	–	–
Микро–твердость	$H = \frac{P}{S_п}$	Диагональ отпечатка	d	–	–
Твердость по Роквеллу	*HRB* *HRC* *HRA*	Поверхность отпечатка	$S_к = \frac{4\sin\frac{\psi}{2}}{\pi d^2} = 1{,}11 d^2$ $S_п = \frac{2\sin\frac{\psi}{2}}{d^2}$	–	–

П р и м е ч а н и я. $P_{0,05}$ – 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–Δl" и осью деформации, увеличивается в полтора раза на линейном упругом участке;

$P_т$ – постоянная нагрузка, при которой возникает пластическая деформация образца;

$P_{0,2}$ – нагрузка, вызывающая удлинение, равное 0,2%;

P_{max} – максимальная нагрузка;

P_i – нагрузка в любой момент деформации;

l_0, d_0 – расчетные длина и диаметр образца;

$l_{0р}$ – начальная длина участка образца, на котором определяется равномерное относительное удлинение;

$l_{кр}$ – конечная длина участка образца, на котором определяется равномерное относительное удлинение после разрыва;

$l_у$, $d_у$ – расчетные длина и диаметр образца в момент начала образования шейки;

$l_к$, $d_к$ – расчетные длина и диаметр образца после разрыва;

F_0, $F_у$, $F_к$, F_i – площадь поперечного сечения образца до испытания, в момент начала образования шейки, после разрыва и в любой момент деформации;

P – масса маятника;

l – длина маятника;

α и β – углы подъема маятника до и после излома образца;

F – площадь поперечного сечения образца в месте надреза;

P – усилие вдавливания;

D – диаметр шарика;

d – диаметр отпечатка;

ψ – угол заострения конуса (90˚ или 120˚) или пирамиды (136˚).

Методики механических испытаний регламентированы стандартами. В результате испытаний устанавливают соответствие значений заданных характеристик требованиям стандартов (государственных, отраслевых) на технические условия поставки и приемки.

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 $\sigma_{iу}$, интенсивность напряжений в момент разрушения $\sigma_{iр}$).

Наиболее полно механические свойства металлов и сплавов характеризуются диаграммами, кривыми упрочнения, построенными в координатах «интенсивность напряжений – интенсивность деформаций» $\sigma_i - \varepsilon_i$ (см. подразд. 3.3). 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 $\sigma_i, A_{уд_i}, E_{кi}, E_{\sigma_i}$.

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 $\sigma_в = C_1 HB; \sigma_в = C_2 HV$, 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 НДС заготовки.

За основу указанного метода принято положение о существовании функциональной связи между твердостью *HV*, степенью деформации e_i и интенсивностью напряженного состояния σ_i (рис. 6.19). 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 представляет сложности. 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).

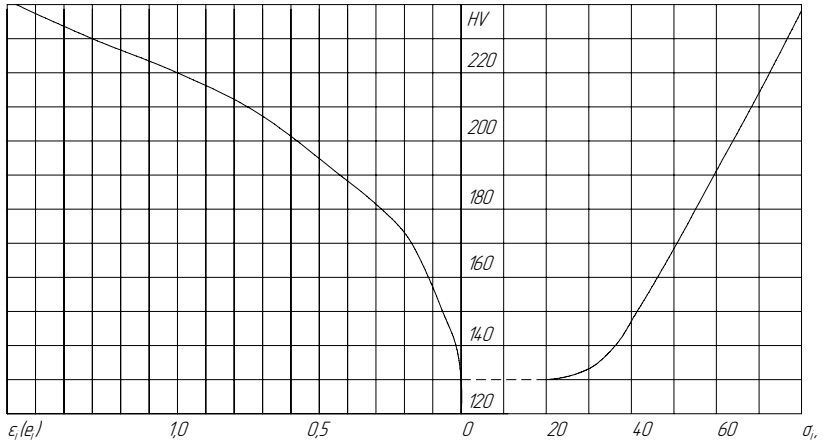


Рис. 6.19. Тарировочный график $\sigma_i - HV - e_i$ для малоуглеродистой стали

Рассмотренные методы позволяют измерять макротвердость металла, определяемую сопротивлением пластическому деформированию столь большого объема, при котором не сказываются различия в действительной твердости его отдельных микрообъе-

мов. Для измерения твердости материала в его микроскопически малых объемах применяются методы микротвердости, позволяющие проводить тонкий анализ физико-механических свойств в локальных объемах и при малых толщинах заготовок. Эти методы более трудоемки, требуют специальной подготовки поверхности контролируемого образца и высокой квалификации оператора.

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 литературе и 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:

1) отношение предела текучести к временному сопротивлению $\sigma_{0,2} / \sigma_в$;

2) коэффициент деформационного упрочнения *n* в уравнении степенного вида

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^n \qquad (6.3)$$

аппроксимирующего диаграмму $\sigma_i - \varepsilon_i$;

3) коэффициент анизотропии свойств листового материала $R = \varepsilon_B / \varepsilon_S$ – коэффициент нормальной анизотропии ($\varepsilon_в, \varepsilon_S$ – деформации в направлении ширины и толщины образца);

$$r = R / (1+R) \qquad (6.4)$$

– коэффициент поперечной деформации; средний коэффициент анизотропии $R_{ср} = 0{,}25\ (R_0 + 2R_{45} + R_{90})$, где R_0, R_{45}, R_{90} – коэффи-

циент анизотропии в различных направлениях относительно направления прокатки;

4) удельная работа формоизменения на стадии устойчивого пластического деформирования, определяемая по соотношению вида

$$A_{2\text{уд}} = \sigma_{i\text{у}} \frac{n}{1+n} \tag{6.5}$$

или

$$A_{2\text{уд}} = \sigma_{\text{в}} (2,72)^n \frac{n}{1+n} \tag{6.6}$$

– без учета анизотропии свойств;

$$A_{2\text{уд}} = 1,2247 \frac{\sqrt{1+R}}{2+R} \sigma_{i\text{у}} \frac{n}{1+n}; \tag{6.7}$$

$$A_{2\text{уд}} = 1,2247 \frac{\sqrt{1+R}}{2+R} \sigma_{\text{в}} (2,72)^n \frac{n}{1+n} \tag{6.8}$$

– с учетом анизотропии свойств;

5) показатель $Б = 6,89 + 0,036\sigma_{\text{т}(0,2)} + 1,62R - 0,075A + 12,62n,$ (6.9)

где $A = \dfrac{\varepsilon(B_{\max} - B_{\min})}{B_0}$ – степень неравномерности деформации, определяемая по ТУ 14–105–322–76;

6) показатель (ТУ 14–15–110–81)

$$F_A = -0,017\sigma_{\text{т}} + 0,032\delta_{25} + 0,875R + 4,8n - 0,12A + 7,601, \tag{6.10}$$

δ_{25} – полное относительное удлинение (коэффициенты R и n определяют при растяжении образца на 10 или 17 %);

7) твердость *HB*, *HV*, *HRB*.

Предел текучести $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$, коэффициент деформационного упрочнения n, коэффициент анизотропии R и r определяют по результатам испытания на растяжение, регламентированного ГОСТом 11701–84 и специальными методиками. Коэффициент n определяют из следующих соотношений:

$$n = \varepsilon_{i\text{у}} = \ln \frac{F_0}{F_{\text{у}}} = \ln \frac{l_{\text{у}}}{l_0} \tag{6.11}$$

или

$$n = \ln(1 + \delta_{\text{р}}), \tag{6.12}$$

где $\delta_р = \dfrac{l_у - l_0}{l_0}$ – относительное равномерное удлинение.

Числовое значение n ровно 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 на основе статистической обработки результатов испытаний целого ряда углеродистых и других сталей получено соотношение

$$\frac{\sigma_{0,2}\left(\sigma_т\right)}{\sigma_в} = 1,005 - 1,53n\,, \qquad (6.13)$$

откуда следует:

$$n = 0,65\left(1,005 - \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_в}\right). \qquad (6.14)$$

Анализ результатов исследований и производственная практика свидетельствуют 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 отдель-

ности. С их увеличением возрастают контактные напряжения. При этом в результате выдавливания происходит нарушение смазочной пленки, возможно схватывание (налипание) металла и появление задиров. 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 $A_{2уд}$:

$$\left(m_в\right)_{пр} = \frac{C_B}{A_{2уд}} C_A; \qquad (6.14)$$

$$\left(m_{от}\right)_{пр} = C_O + \frac{C_{от}}{A_{2уд}}, \qquad (6.15)$$

где C_A, C_B, C_O, $C_{от}$ – эмпирические коэффициенты (табл. 6.15).

Таблица 6.15

Эмпирические коэффициенты расчетных формул (6.14), (6.15)

Вид операции	Относительная толщина заготовки, $\frac{S_0}{D_0}100$	C_B	C_A	C_O	$C_{от}$
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. 6.16 приведены рекомендуемые рядом исследователей уровни выделенных показателей по категориям групп сложности вытяжки, которые могут служить ориентиром при оценке штам-

пуемости материалов.

Таблица 6.16

Уровни показателей штампуемости материалов

Показатель	Категория сложности вытяжки						
	ВОСВ	ОСВ	СВ	ВГ	Г	Н	БВ
$\sigma_т/\sigma_в$	< 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
$A_{2уд}$, МПа	≥ 70	60	50	40	30	20	< 20
$Б$	7-9	5-7	3-5	1-3	—	—	—
F_A	8	7	5	3	—	—	—
$m_{пр}$	0,47-0,48	0,49-0,50	0,51-0,52	0,53-0,54	0,55-0,56	—	—

6.6.5. 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 ограниченные 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 ОПД на всех или отдельных стадиях моделируемого процесса штамповки.

2. Физико-механические явления, возникающие в ОПД при технологическом испытании и в моделируемом процессе, должны иметь одинаковую природу, т. е. описываться одинаковыми дифференциальными (интегральными, интегродифференциальными) – уравнениями.

3. Безразмерные начальные и граничные значения параметров

должны быть одинаковыми.

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 ОПД при технологическом испытании будет соблюдено на соответствующих стадиях формоизменения, если будут соблюдены условия подобия деформированного состояния, т. е.

$$(\varepsilon_{ij})_{\text{ти}}=(\varepsilon_{ij})_{\text{шт}}, \qquad (6.16\ a)$$

$$(\nu_{\varepsilon})_{\text{ти}}=(\nu_{\varepsilon})_{\text{шт}}, \qquad (6.16\ б)$$

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 заданы или в напряжениях ($\tau_{\text{к}}$), или в перемещениях ($u_{\text{к}}$), или смешанным образом; уровень (интенсивность) локальной деформации (ε_i), которой при заданных нагрузках и граничных условиях зависит от свойств материала и его реологического поведения, согласно $\varepsilon_i = \varepsilon_i(\omega_{i\Sigma}, e_{i\text{р}}, \alpha)$, где $\omega_{i\Sigma} = \omega_{i0} + \omega_{ii}$ – суммарная, накопленная поврежденность.

На основе известных теоретических и экспериментальных исследований можно записать:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}\left(\frac{Y}{l}, \frac{u_{\text{к}}}{l}, \frac{\sigma_{\text{к}}}{\sigma_{i1}}, \frac{R_a}{l}, f, \frac{\upsilon \cdot \eta}{\sigma_{i1}}, \frac{E_{\text{ин}}}{\sigma_{i1}}\right), \qquad (6.17)$$

где Y – обобщенное обозначение декартовых координат (x, y, z); l – масштаб подобия.

Признаки и условия геометрического подобия ОПД имеют общий вид:

$$\left(\frac{x}{l}\right)_{\text{ти}} = \left(\frac{x}{l}\right)_{\text{шт}}; \left(\frac{y}{l}\right)_{\text{ти}} \left(\frac{y}{l}\right)_{\text{шт}}; \left(\frac{z}{l}\right)_{\text{ти}} \left(\frac{z}{l}\right)_{\text{шт}}.$$

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

$$\left(\frac{x}{y}\right)_{\text{ти}} = \left(\frac{x}{y}\right)_{\text{шт}}; \left(\frac{x}{z}\right)_{\text{ти}} \left(\frac{x}{z}\right)_{\text{шт}}; \left(\frac{y}{z}\right)_{\text{ти}} \left(\frac{y}{z}\right)_{\text{шт}}. \qquad (6.18)$$

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 должны быть структурно идентичными и иметь одинаковый уровень поврежденности (см. разд. 3), т. е.

$$\begin{aligned} &(\omega_{i0})_{\text{ти}} = (\omega_{i0})_{\text{шт}}; \\ &(\omega_{ii})_{\text{ти}} = (\omega_{ii})_{\text{шт}}; \\ &(E_{\sigma_i})_{\text{ти}} = \left[\frac{1}{\sigma_i}\frac{d\sigma_i}{d_i}\right]_{\text{ти}} = (E_{\sigma_i})_{\text{шт}} = \left[\frac{1}{\sigma_i}\frac{d\sigma_i}{d_i}\right]_{\text{шт}}, \end{aligned} \qquad (6.19)$$

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:

$$\left(\frac{\sigma_x + p}{\sigma_i}\right)_{\text{ти}} = \left(\frac{\sigma_x + p}{\sigma_i}\right)_{\text{шт}}; \left(\frac{\tau_{zx}}{\sigma_i}\right)_{\text{ти}} = \left(\frac{\tau_{zx}}{\sigma_i}\right)_{\text{шт}},$$

где p – гидростатическое давление.

Приведенные соотношения определяют подобие напряженного состояния образца в зоне ОПД 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 предназначена для оп-

ределения параметров процессов разделительной штамповки (отрезки, вырубки, пробивки и др.). Основным видом технологического испытания первой группы служит испытание на срез. Вторая группа 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 предназначены для оценки качества штампуемых деталей, изготавливаемых соответственно раздачей и обжимом из трубных или полых штампованных заготовок.

Анализ технологических испытаний, в особенности стандартизированных, 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 производится на универсальных испытательных машинах, на которых устанавливается специальный экспериментальный вырубной штамп.

При этом определяются следующие характеристики:

$\left(\sigma_{\text{ср}}\right)_{\text{усл}} = \dfrac{P_{\max}}{F_{\text{усл}}}$ – условное сопротивление срезу;

$\left(\sigma_{\text{ср}}\right)_{\text{ист}} = \dfrac{P_{\max}}{F_{\text{ист}}}$ – истинное сопротивление срезу;

$\dfrac{h_m}{S_0}$ – 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; $F_{\text{ист}} = \pi D_0 \left(S_0 - \dfrac{h_m}{S_0} \right)$ действительная площадь по-

верхности среза; D_0, S_0 – диаметр и толщина круглой заготовки; h_m – величина хода пуансона до момента достижения $P_{\max}$, примерно равного высоте блестящего пояска, образующего на поверхности среза.

Анализ характера диаграмм $P-h, \left(\sigma_{\text{ср}}\right)_{\text{ист}_i} - h_i / S_0$ 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: $m_{\text{пр}1}=d_{1\text{ср}}/D_0$ – для первой вытяжки; $m_{\text{пр}i}=d_{i\text{ср}}/d_{i-1\text{ср}}$ – для любой последующей вытяжки, где $d_{1\text{ср}} = d_{\text{п}1} + S_0$; $d_{i\text{ср}} = d_{\text{п}i} + S_0$; $d_{\text{п}1}$, $d_{\text{п}i}$ – диаметры пуансона на пер-

вой и последующей вытяжках. Для тонкостенных заготовок можно принимать наружные диаметры заготовок d, d_i.

Предельным коэффициентом вытяжки считается такой, при котором еще не происходит разрыв заготовки, но дальнейшее незначительное увеличение ее диаметра (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. 6.17 приведены в качестве примера нормы на глубину вытяжки (формовки) для некоторых материалов.

Таблица 6.17

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 НДС заготовки в зоне очага деформации близка к объемной 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 допустимого (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 наблюдаются массовые обрывы дна колпачков, испытание повторяют на других прессах и в случае повторения обрывов относят их 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. 6.20, *а*). Опытные заготовки деформируют в универсальном штампе инструментом, имеющим форму, характерную для процесса вытяжки 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 с последующим 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. 6.20, *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 расстоянии l от произвольного сечения до места разрушения (рис. 6.20, *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 $F_0 = \pi(D_0 - S^j_{0ср})S^j_{0ср}$ – площадь поперечного сечения исходной заготовки, соответствующего месту разрушения; $F_р = \pi(D - S_{рср})S_{рср}$ – площадь поперечного сечения заготовки в месте разрушения.

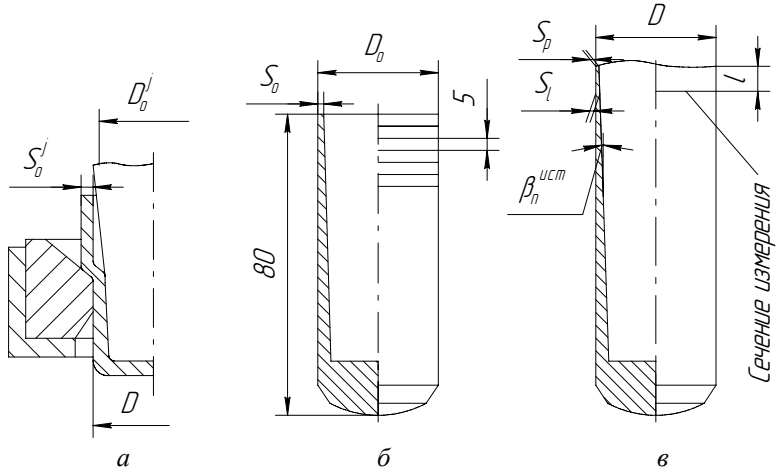


Рис. 6.20. Схема натурных испытаний при вытяжке с утонением

Для исследования предельных деформаций при обжиме применяется шестая группа технологических испытаний.

Авторами предложен метод технологического испытания, который заключается в деформировании до потери устойчивости пластинчатого прямоугольного образца (рис. 6.21) 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.

Габаритный размер образца *B* (рис. 6.21, *а*) определяется с учетом зарождающейся на образце складки в приграничных с рабочим инструментом заторможенных зонах. Как установлено, длина

складки L (рис. 6.21, *в*) относительно толщины образца равна $(5\ldots6)S_0$.

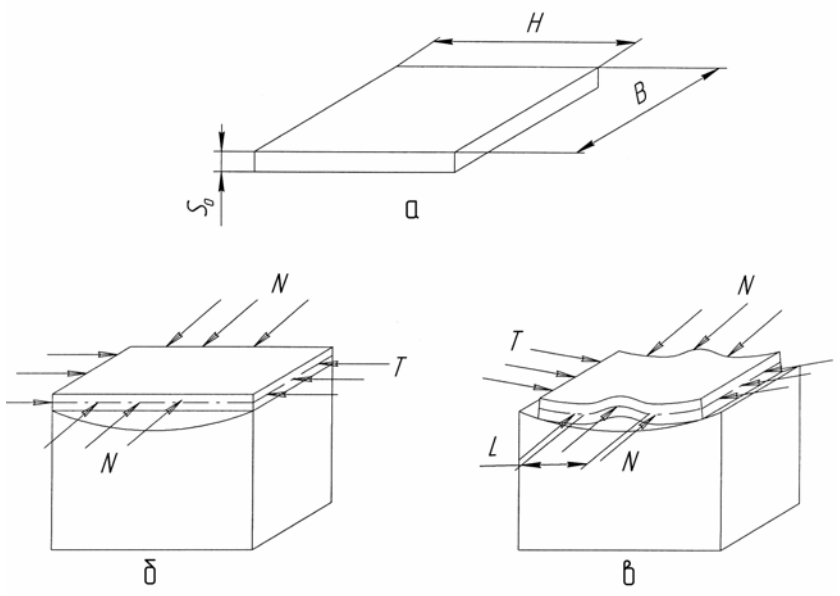


Рис. 6.21. Схема технологического испытания листового материала на пластическое сжатие: *а* – исходный образец; *б* – схема нагружения; *в* – схема потери устойчивости образца

Экспериментальные исследования размеров заторможенной, приграничной с инструментом зоны образца показали, что ее протяженность равна приблизительно $1{,}5S_0$. Отсюда размер исходного образца $B \geq (8...9)S_0$. 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) выдав-

ливании могут также исследоваться по схеме натурного процесса (рис. 6.22).

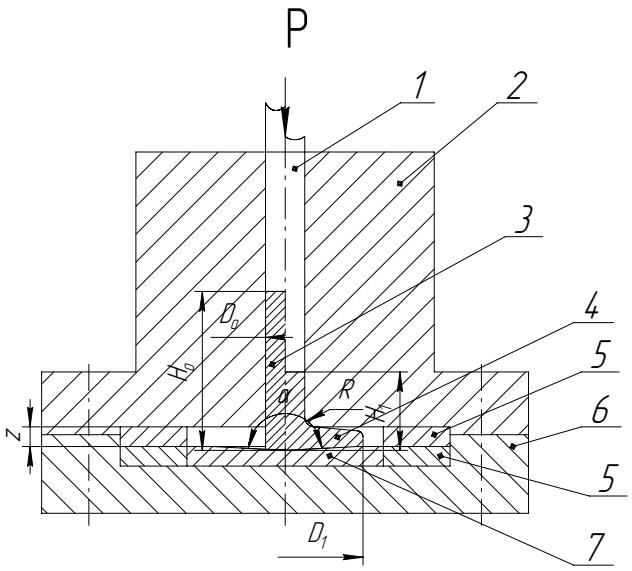


Рис. 6.22. Схема устройства для технологического испытания на радиальное выдавливание: *1* – пуансон; *2* – корпус; *3* – заготовка; *4* – заготовка после деформирования; *5* – кольца; *6* – нижняя плита; *7* – подкладной диск

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 деформа-

ций проводятся статистические исследования параметров распределения.

Контрольные вопросы

1. Какие требования, предъявляемые к металлическим материалам, характеризуют эксплуатационные свойства патронов?
2. Какие требования, предъявляемые к металлическим материалам, характеризуют их технологические свойства?
3. Какие основные металлические материалы применяются в патронном производстве?
4. В чем состоит явление коррозионного растрескивания металлов? Какие сплавы подвержены коррозионному растрескиванию?
5. Что представляют собой латуни? Какие марки латуней применяются в патронном производстве?
6. Как температура процесса обработки и содержание цинка в сплаве медь-цинк влияют на изменение фазового состояния латуней?
7. Какие марки латуней в наибольшей степени удовлетворяют эксплуатационным и технологическим требованиям?
8. В какой степени свинец как конструкционный материал удовлетворяет основным требованиям?
9. Какие марки сталей находят применение для изготовления металлических элементов патронов?
10. Дайте характеристику малоуглеродистых штампуемых сталей, применяемых в патронном производстве, по диаграмме фазового состояния «железо–углерод».
11. Что представляют собой по фазовому составу и свойствам металлокерамические твердые сплавы?
12. Какие материалы относятся к группе биметаллов, какие способы применяют для их изготовления и в чем состоят их преимущества по сравнению с латунями и сталями?
13. Какие методы входного контроля металлов применяют в патронном производстве?
14. Какие методы контроля качества металла, полуфабрикатов и готовых деталей применяют в патронном производстве?
15. Что такое штампуемость металла и какие технологические факторы влияют на штампуемость?
16. Что понимают под предельной и допустимой степенями деформации?
17. Как влияет содержание основных химических элементов на штампуемость сталей?
18. Как влияет на штампуемость латуни содержание химических элементов?
19. Какие виды структуры сплавов «железо–углерод» и «медь–цинк» считают наиболее благоприятными для штамповки?
20. Назовите основные виды дефектов металлургического производства листового проката, влияющие на качество штампуемых деталей.
21. Какие методы механических испытаний металлов наиболее широко применяют в патронном производстве?
22. Какие механические свойства наиболее полно характеризуют эксплуатационные и технологические свойства?

23. Назовите основные комплексные показатели механических свойств материалов, характеризующих его штампуемость.

24. Какие виды испытаний относятся к технологическим? Приведите примеры технологических испытаний.

25. Сформулируйте условия подобия технологических испытаний и натурных процессов.

26. Дайте характеристику метода натурных испытаний и определите его назначение и область применения.

Библиографический список

1. *Агеев Н.П.*, Спинул Г.П. Механические и технологические свойства конструкционных и металлических материалов патронно-гильзового производства. Учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию. СПб.: БГТУ, 1993. 87 с.

2. *Мальцев М.В.* Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1970. 364 с.

3. *Смирнов-Аляев Г.А.*, Чикидовский В.П. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. Л.: Машиностроение, 1972. 360с.

4. *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, 1995. 527 с.

5. *Аверкиев А.Ю.* Методы оценки штампуемости листового металла. М.: Машиностроение, 1985. 176 с.

7. ПРОЦЕССЫ ЛИСТОВОЙ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ ШТАМПОВКИ

7.1. Технологические особенности процессов разделительной штамповки

7.1.1. Отрезка

Отрезка применяется для изготовления полос, лент и штучных заготовок, поступающих в дальнейшем на штамповку (вырубку, вытяжку и др.).

По виду движения рабочего инструмента различают отрезку с 1) возвратно-поступательным и 2) вращательным движением рабочего инструмента.

Способы первой группы реализуются преимущественно на ножницах и прессах с механическим приводом (при толщине разрезаемого проката до 10…12 мм). Для отрезки толстолистового проката применяют также ножницы с гидравлическим приводом.

Различают отрезку ножами с параллельным и наклонным расположением режущих кромок (рис. 7.1 и 7.2).

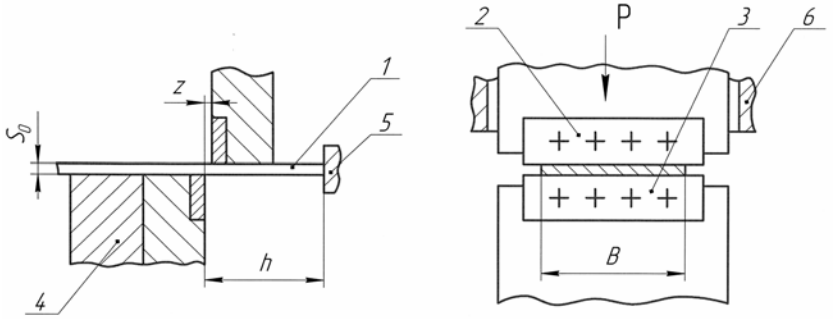


Рис. 7.1. Технологическая схема процесса отрезки ножами с параллельными режущими кромками: *1* – исходная листовая заготовка; *2*, *3* – верхний и нижний ножи; *4* – стол; *5* – упор; *6* – направляющие ползуна ножниц (пресса)

При отрезке ножами с параллельным расположением режущих кромок отделение одной части заготовки от другой происходит одновременно по всему поперечному сечению листа (полосы), что требует больших технологических усилий. Этот способ в основном применяется для резки тонколистового материала на сравнительно узкие полосы, а также для резки неметаллических материалов.

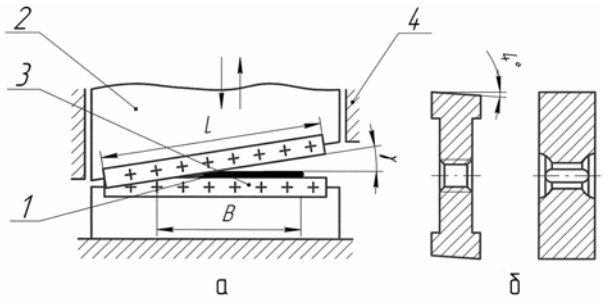


Рис. 7.2. Технологическая схема процесса отрезки ножами с наклонными режущими кромками (*а*) и форма поперечного сечения ножей (*б*): *1* – исходная заготовка; *2*, *3* – верхний и нижний ножи; *4* – направляющие ползуна ножниц (пресса)

В отличие от этого способа отрезка ножами с наклонным расположением режущих кромок характеризуется неодновременным по сечению листа (полосы) отделением одной части заготовки от

другой и во много раз меньшими технологическими усилиями.

По типу применяемого технологического оборудования с возвратно-поступательным движением рабочего инструмента и наклонными ножами известны способы отрезки на гильотинных, рычажных и вибрационных ножницах.

Ножи гильотинных ножниц наклонены относительно друг друга на небольшой угол, угол створа $\varphi = 2\ldots6^{\circ}$, величина которого зависит от толщины разрезаемого материала. Величина угла назначается из условия самоторможения листа при отрезке, исключающего его выталкивание из зоны очага деформации. Зазор между ножами устанавливается в пределах 0,05…0,2 мм (с увеличением толщины зазор увеличивается). Установка заготовки (листа, полосы) перед отрезкой выполняется по передним и задним упорам. Ножи для гильотинных и параллельных ножниц применяют цельные (рис. 7.3, *а, б*) и составные (рис. 7.3, *в*). Цельные ножи могут иметь четыре и две режущих кромок, составные – одну, с углами резания δ как равными 90º, так и менее 90º, а также передними (α) и задними (γ) углами, уменьшающими трение на поверхностях контакта заготовки с инструментом.

Для резки материалов средней и высокой твердости рекомендуются следующие геометрические параметры ножей: $\delta = 75\ldots85^{\circ}$; $\gamma = 5\ldots15^{\circ}$; $\alpha = 30'\ldots3^{\circ}$. Для мягких материалов угол резания $\delta = 65\ldots70^{\circ}$, для весьма мягких – $\delta < 60^{\circ}$.

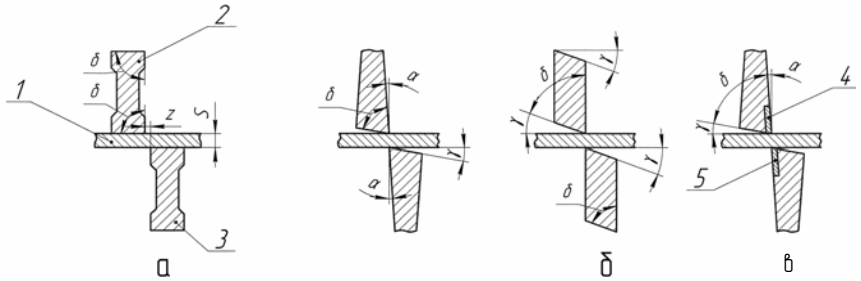


Рис. 7.3. Ножи для гильотинных ножниц: *а*, *б* – цельные; *в* – составные; *1* – заготовка; *2*, *3* – ножи; *4*, *5* – сменные ножи-пластинки

Способ отрезки на гильотинных ножницах применяется для резки листового материала на полосы и штучные заготовки при условии, что временное сопротивление (предел прочности) материала не превышает значения $\sigma_в \leq 500$ МПа (50 кгс/мм^2). Наибольшая толщина разрезаемого материала в зависимости от типа

ножниц достигает значений 40…60 мм, а длина реза (ширина листа) до 4500 мм.

Недостатком способа резки наклонными ножами является отгиб отрезаемого материала в направлении движения ножа и скручивание полосы, что требует в некоторых случаях применения правки отрезанной заготовки перед последующей штамповкой.

Применение специальных прижимных устройств (механических, пневматических) позволяет уменьшить или предотвратить полностью искривление заготовок при отрезке.

Отрезка на вибрационных ножницах, в отличие от гильотинных, производится короткими ножами с большим углом створа $\varphi = 24…30^{\circ}$, одному из которых сообщается возвратно-поступательное движение большой частоты (число двойных ходов в минуту в пределах 2000…2500).

Принимается длина ножей 35…40 мм, передний угол $\gamma = 6…7^{\circ}$. Из-за большого угла створа листовая заготовка подается к ножам принудительно. Ход ножниц изменяется в пределах от 2 до 4 мм. Особенность настройки вибрационных ножниц заключается в том, что перекрытие ножей либо мало (1,0…1,5 мм), либо совсем отсутствует, а зазор между ножами несколько больше оптимального (z = 0,2…0,25 S_0). Указанная особенность обеспечивает возможность поворота заготовки относительно рабочих кромок ножей в процессе резки.

Отрезка на вибрационных ножницах применяется для получения заготовок с криволинейным контуром с малыми радиусами скругления (не менее 12…15 мм) из листовых заготовок с толщиной до 10 мм.

К числу недостатков вибрационных ножниц, ограничивающих область их применения условиями мелкосерийного производства, следует отнести быстрый износ ножей и наличие заусенцев и зарубов по контуру отрезаемой заготовки. Обычно после резки на вибрационных ножницах заготовки набираются в пакеты и фрезеруются, что увеличивает трудоемкость их изготовления.

Отрезка вращающими круглыми ножами производится на дисковых ножницах. Дисковые ножницы по числу ножей подразделяются на однодисковые (второй нож выполнен неподвижным в виде полосы и прикреплен к столу), парнодисковые и многодисковые.

Парнодисковые ножницы имеют два принудительно вращающихся в разные стороны с одинаковой угловой скоростью диско-

вых ножа с параллельными (рис. 7.4) или наклонными осями.

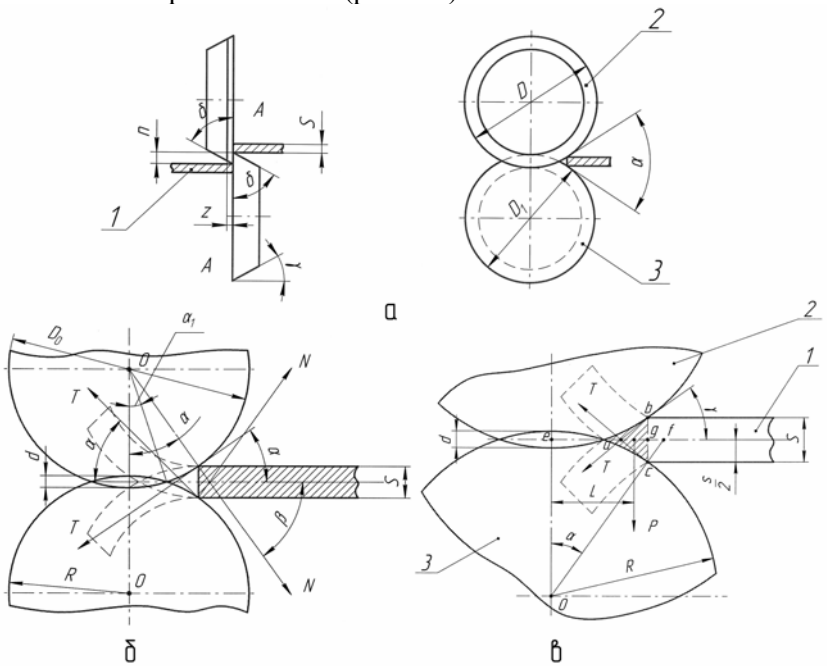


Рис. 7.4. Технологическая схема отрезки на парнодисковых ножницах (*а*); схема действия сил при отрезке (*б*); очаг пластической деформации (*в*): *1* – заготовка; *2*, *3* – дисковые ножи

Характерной особенностью способа отрезки дисковыми ножами с параллельными осями является захват и протягивание заготовки ножами в процессе резки при обеспечении определенных условий самозахвата: угле захвата $\varphi \leq 14^{\circ}$, перекрытии ножей $a = (0{,}2\ldots0{,}3)\ S_0$, размерах ножей $D = (25\ldots30)\ S_0$ и $b = 50\ldots90$ мм при резке толстолистового материала ($S_0 > 10$ мм); $D = (35\ldots50)\ S_0$ и $b = 20\ldots25$ мм при резке тонколистового материала ($S_0 < 10$ мм). Зазор между ножами $z = (0{,}05\ldots0{,}07)\ S_0$, угол резания $\delta = 87\ldots90^{\circ}$, передний угол $\gamma = 0\ldots3^{\circ}$.

Парнодисковые ножницы с горизонтальным расположением осей применяются для резки листов на полосы при толщине разрезаемого материала до $S_0 = 30$ мм со скоростью резания от 5 до 60…90 м/мин (верхние значения соответствуют малым толщинам).

Отрезка на дисковых ножницах с нижним наклонным ножом (угол наклона его оси $\varphi = 30\ldots40^{\circ}$) применяется для резки полос, круглых дисков и кольцевых заготовок из материалов толщиной

S_0 = 2,5…30 мм со скоростью резания от 20 до 5 м/мин соответственно. Размеры ножей назначаются в следующих пределах: D = = 20S_0, b = 50…80 мм для толщин S_0 > 10 мм; D = 28 S_0, b = = 15…20 мм для толщин S_0 < 3 мм.

Отрезка дисковыми ножницами с обоими наклонными ножами применяется только для получения круглых, кольцевых и криволинейных заготовок с малым радиусом. Криволинейная поверхность задней режущей грани ножей обеспечивает свободный поворот заготовки. Толщина разрезаемого этим способом материала может достигать значений порядка 20 мм, скорость резания 10…1,25 м/мин. При этом принимаются: $z \leq 0{,}2\ S_0$, $c \leq 0{,}3\ S_0$, D = = 12S_0, b = 40…60 мм при S_0 > 10 мм; D = 20 S_0, b = 10…15 мм при S_0 < 5 мм.

Многодисковые ножницы имеют несколько пар дисковых ножей и применяются в массовом и крупносерийном производстве для разрезки листов и рулонов толщиной до 3 мм на полосы и ленты, а также для обрезки полос по ширине. Число пар ножей на одну больше числа пар полос. Расстояние между ножами устанавливают по требуемой ширине разрезаемых полос B_1, B_2, B_3 (при ширине рулона $B_р$) при помощи мерных распорных колец (рис. 7.5, *а*). Для уменьшения искривления отрезаемых полос на металлические распорные кольца насаживают резиновые кольцевые прижимы.

Рекомендуют следующие значения технологических параметров: угол резания δ = 90º, перекрытие a = ± 0,5 S_0, зазор между ножами z = (0,1…0,2)S_0, размеры ножей D = (40…125)S_0, b = = 15…30 мм.

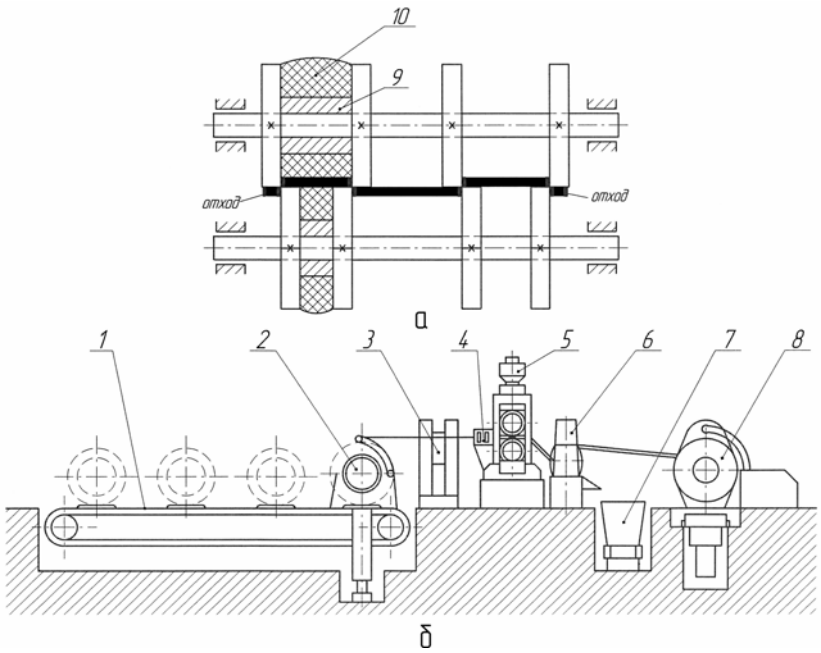


Рис. 7.5. Технологические схемы отрезки на многодисковых ножницах с прижимом (*а*) и автоматической линии для продольной резки (*б*): *1* – цепной конвейер; *2* – разматывающее устройство; *3* – правильно-подающее устройство; *4* – правильный механизм; *5* – дисковые ножницы; *6* – кромкокрошитель; *7* – 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.

Резка широкорулонного проката весьма экономична, сокращает отходы металла и трудоемкость заготовительных работ (на 35...40%) и может производиться на специализированных автоматических линиях продольной резки.

Отрезка в штампах широко применяется для безотходной резки штучных заготовок и деталей с толщиной от 0,2…0,3 до 6…9 мм из предварительно нарезанных полос и лент (возможно применение резки в штампах и из листа). При большой толщине полосы (листа) в условиях односторонней резки значительно искажается форма

отрезаемой заготовки и ухудшается качество поверхности среза. Нижний предел толщины определяется из соображений удобства работы с тонкой полосой или лентой, так как при малой толщине затрудняется их подача и фиксация. В патронном производстве отрезка в штампах применяется при получении безотходных заготовок в виде прямоугольника, квадрата, шестигранника при толщинах не свыше 8,4 мм. На рис. 7.6 показаны схемы раскроя и отрезки из полосы заготовок в форме квадрата и шестигранника. Схема *а* позволяет за один ход ползуна пресса получить пять квадратных заготовок, а схема *б* – девять шестигранных. То есть указанные схемы обеспечивают не только высокий коэффициент использования металла, но и высокую производительность процесса. Характерной особенностью процесса является резка по незамкнутому контуру, например: трехсторонняя в одном ряду резка по контуру *a b c d* при получении квадратной заготовки (см. рис. 7.6, *а*), пятисторонняя по контуру *q l m e k h* – шестигранной заготовки (см. рис. 7.6, *б*) на первой позиции штампов и односторонняя резка на второй позиции. На первой позиции применяются пуансоны и матрицы с контурами, соответствующими контурам отрезаемых заготовок, на второй позиции – отрезные ножи.

Применение прижимов в штампах повышает точность отрезаемых заготовок. При ширине заготовки (детали), равной ширине полосы (ленты), может применяться безотходная (рис. 7.7, *а*) и малоотходная (рис. 7.7, *б*) резка.

Безотходная резка позволяет за каждый ход ползуна пресса получать две заготовки (детали), одна из которых проталкивается через отверстие в матрице, а другая остается на ее поверхности и сталкивается при определенной подаче полосы до упора или соскальзывает под действием собственного веса при наклонном расположении стола пресса.

Необходимым условием получения качественных заготовок (деталей) при двусторонней резке является правильная установка полосы по ширине относительно контура пуансона, так как незначительное отклонение оси полосы от оси инструмента приведет к искажению формы и размеров штампуемой заготовки.

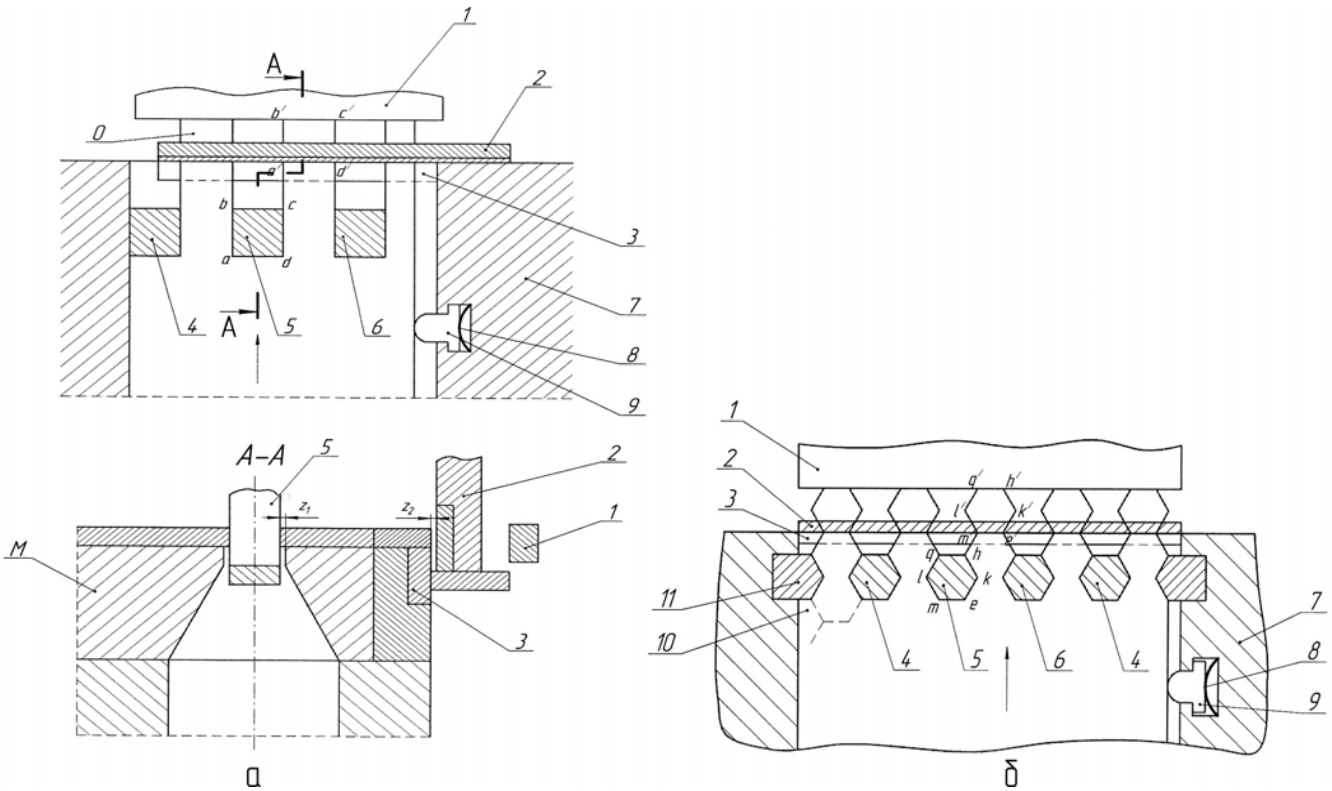


Рис. 7.6. Резка полосы на квадратные (*а*) и шестигранные (*б*) заготовки: *1* – упор; *2*, *3* – отрезные ножи; *4*, *5*, *6* – пуансоны; *7* – направляющие линейки; *8*, *9* – боковой прижим; *10* – матрица; *11* – боковой нож

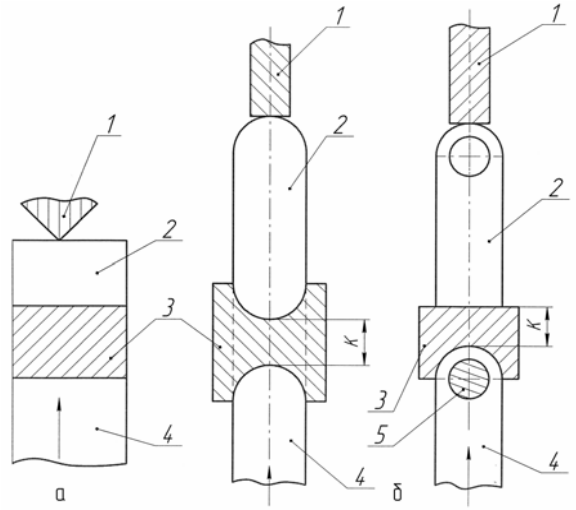


Рис. 7.7. Схема отрезка без отхода (*а*) и с отходом (*б*): *1* – упор; *2* – деталь; *3* – пуансон; *4* – полоса (лента); *5* – пуансон пробивки

Ширина перемычки k, удаляемой отрезным пуансоном, если это не связано с формой детали, принимается в зависимости от толщины исходной заготовки (при S_0 = 1 мм, a = 3 мм; при $S_0 > 1$ мм, $a = (2…3)\ S_0$).

7.1.2. Вырубка и пробивка

В патронном производстве вырубка применяется для получения заготовок для вытяжки, а пробивка – для получения затравочных отверстий в гильзах.

По механизму протекания эти процессы аналогичны и включают три характерные стадии: упругопластическое деформирование, пластическое деформирование и разрушение (рис. 7.8).

На начальной, первой, стадии процесса вырубки (пробивки) в заготовке возникает напряженное состояние, аналогичное напряженному состоянию пластины, свободно лежащей на плите (матрице) с отверстием и подвергаемой воздействию нагрузки, равномерно распределенной на участке отверстия плиты (матрицы).

Одновременно с прогибом части заготовки, размещенной внутри контура отверстия матрицы, изменяется напряженное состояние, так как площадь контакта заготовки с пуансоном и матрицей уменьшается до узкой кольцевой поверхности.

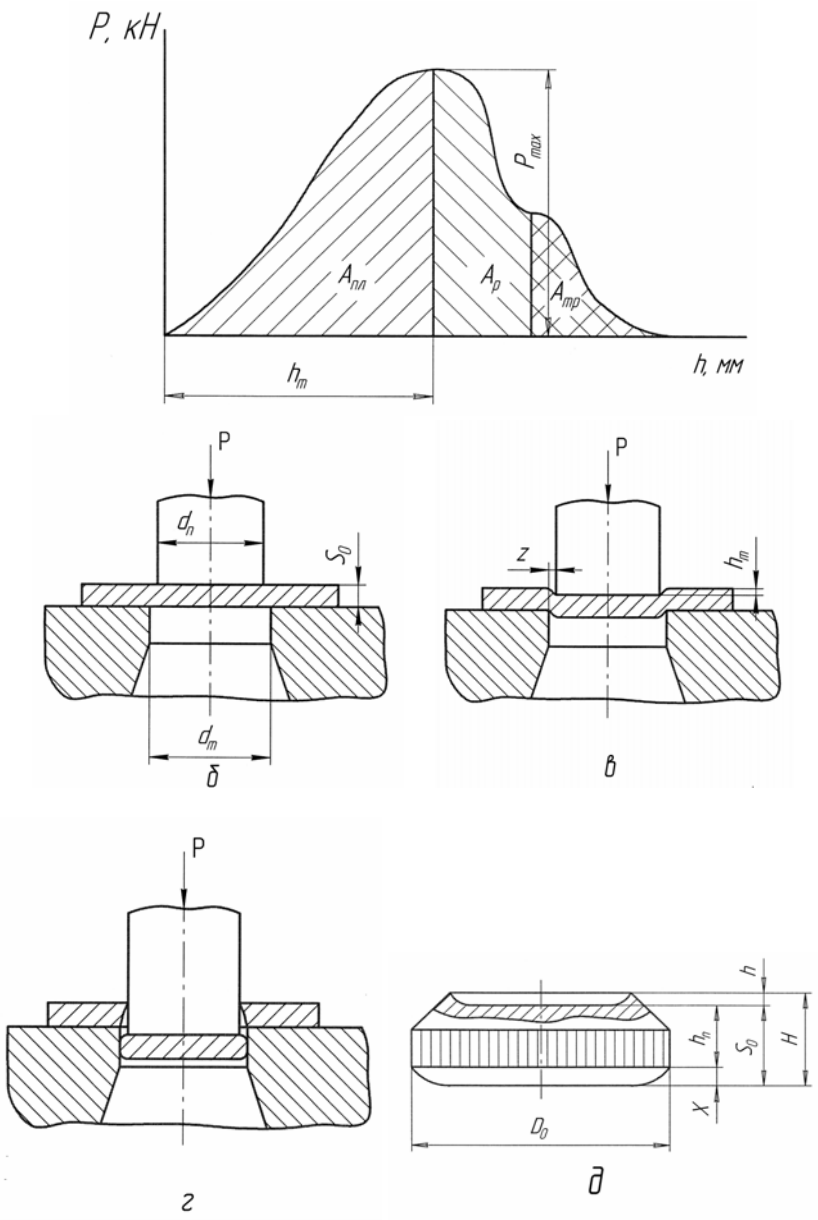


Рис. 7.8. Машинная диаграмма «усилие деформирования – путь инструмента»

P–h (*а*) и стадии формообразования заготовки: *б* – начальная (упруго-

пластическое деформирование); *в* – конец стадии пластического деформирования и начало стадии разрушения; *г* – конечная стадия разрушения; *д* – вырубленная заготовка

Вначале прогиб носит упругий характер, но при дальнейшем внедрении пуансона сопровождается остаточной деформацией, величина которой зависит от механических свойств материала, толщины заготовки и величины одностороннего зазора z между режущими кромками пуансона и матрицы. При этом происходит переход к стадии пластического деформирования

Наличие зазора z (рис. 7.9) приводит к появлению момента активных сил, равного произведению равнодействующей элементарных сил P, действующих от пуансона и матрицы, на плечо $(z+2a)$, несколько большее, чем величина зазора z, т.е.

$$M_P = P\,(z + 2a), \qquad (7.1)$$

где a – величина смещения точки приложения равнодействующей силы P относительно режущих кромок инструмента.

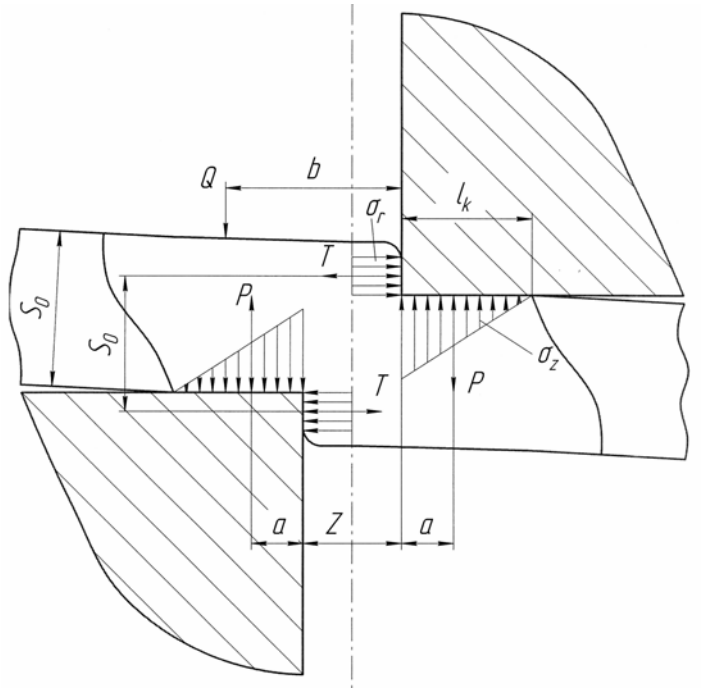


Рис. 7.9. Схема сил, действующих на заготовку в процессах вырубки и пробивки

Принимая упрощенную, в виде треугольника, эпюру распределения нормальных контактных напряжений σ_z, определим значение величины a:

$$a \cong \frac{1}{3} l_к, \tag{7.2}$$

где $l_к$ – длина участка контакта заготовки и инструмента.

В результате действия момента сил M_P происходит некоторый поворот в пространстве и прогиб части заготовки. В наибольшей степени этот поворот проявляется в процессах отрезки по незамкнутому контуру. Это, в свою очередь, приводит к резкой неравномерности распределения нормальных напряжений σ_z на контактных поверхностях. Они изменяются от максимальных значений вблизи режущих кромок до нуля на некотором удалении. Неравномерность распределения напряжений на контактных поверхностях вызывает такую же неравномерность в слоях, параллельных плоскости листа, и по толщине заготовки.

Согласно принципу Сен-Венана о локальности эффекта самоуравновешивающихся внешних нагрузок, в процессах вырубки по мере удаления от режущих кромок в плоскости заготовки и по толщине неравномерность распределения напряжений уменьшается, а протяженность зоны пластических деформаций в направлениях, перпендикулярных к направлению внешних сил резания, увеличивается.

Кроме того, при повороте деформируемой части заготовки относительно режущих кромок инструмента на боковых поверхностях смещаемых частей заготовки и, соответственно, инструмента возникают радиальные силы – силы распора T, которые создают момент реактивных сил M_T:

$$M_T \cong T \cdot S_0 . \tag{7.3}$$

Следует также учитывать, что при вырубке и пробивке по замкнутому криволинейному контуру поворот заготовки вокруг кривой линии под действием момента M_P неизбежно сопровождается появлением тангенциальных сжимающих напряжений σ_θ, препятствующих этому повороту, и, соответственно, момента

внутренних сил – момента сопротивления пластическому изгибу M_σ:

$$M_\sigma \cong \frac{1}{4}\sigma_i \cdot S_0^2 L, \qquad (7.4)$$

где L – периметр вырубаемой детали (пробиваемого отверстия).

С учетом изложенного запишем приближенное условие равенства моментов для случая вырубки (пробивки) без прижима:

$$M_P = M_T + M_\sigma. \qquad (7.5)$$

После подстановки (7.1)…(7.4) в (7.5) и несложных преобразований получим

$$\overline{T} = \left(\overline{z} + \frac{2}{3}\overline{l}_к\right) - \frac{1}{4}\frac{\sigma_i S_0 L}{P}, \qquad (7.6)$$

где $\overline{T} = T/P; \overline{z} = z/S_0; \overline{l}_k = l_к/S_0$.

При приложении к заготовке дополнительной силы прижима Q уравнение (7.6) примет вид

$$\overline{T} = \left(\overline{z} + \frac{2}{3}\overline{l}_к\right) - \frac{1}{4}\frac{\sigma_i S_0 L}{P} - \overline{Q}\overline{b}, \qquad (7.7)$$

где $\overline{Q} = Q/P; \overline{b} = b/S_0$.

Уравнения (7.6) и (7.7) не учитывают силы контактного трения, но позволяют качественно оценить влияние основных технологических факторов на условия вырубки и пробивки. В случае отрезки по незамкнутому контуру $M_\sigma = 0$.

Уменьшение усилия распора $\overline{T}$ при прочих равных условиях повышает стойкость рабочего инструмента и качество штампуемых заготовок (исключает утяжины, заусенцы, надрывы). Этому способствуют уменьшение числовых значений параметров $\overline{z}$, $\overline{l}_к$ и применение прижима.

Качество вырубаемых заготовок и пробиваемых отверстий определяется физико-механическими свойствами металла, формируемыми в процессе деформации в зоне ОПД, и геометрическими параметрами качества.

К физико-механическим свойствам относятся структура металла и степень ее поврежденности, степень накопленной деформации, степень упрочнения (оцениваемая по изменению твердости, предела текучести материала). В состав геометрических параметров качества входят безразмерные параметры, определяющие отклонения от номинальной цилиндрической поверхности заготовки

и характеризующие неоднородность качества поверхности среза.

Для экспериментального определения размеров ОПД применяют различные методы: металлографический анализ макро- и микроструктуры, твердости, делительную сетку в плоскости физического реза штампуемой заготовки.

В частности, количественным методом оценки может служить микроструктурный анализ после рекристаллизационного отжига вырубленных заготовок. На рис. 7.10, *а*, *б* показана микроструктура материала заготовки после вырубки и отжига с выделенными двумя зонами (*A* и *B*), существенно различающимися по величине зерна. В зоне *B* структура крупнокристаллическая, отвечающая так называемой критической степени деформации $e_{i\text{кр}}$, определяемой по диаграмме рекристаллизации. Для исследованной авторами стали 18КП при скорости деформации $\dot{\varepsilon}_i = 2\cdot10^2$ с$^{-1}$ $e_{i\text{кр}} = 0{,}05\ldots0{,}10$.

Рекристаллизационный отжиг проводился при t = 700ºС (время выдержки 60 мин.). При малых скоростях деформации ($3{,}0\cdot10^{-3}$ с$^{-1}$) $e_{i\text{кр}} = 0{,}15$. С увеличением скорости деформации критическая степень деформации уменьшается. Следовательно, размеры ОПД устанавливаются с точностью фиксации граничного значения степени деформации до 0,05…0,10. Для оценки границ дефектного слоя этой точности достаточно. В табл. 7.1 приведены для стали 18КП относительные размеры ОПД, в том числе зоны интенсивной ($e_i > e_{i\text{кр}}$) и малой деформации ($e_i < e_{i\text{кр}}$).

Таблица 7.1

Влияние скорости деформации на размеры ОПД в конечной стадии процесса вырубки (материал: ст. 18КП, S_0 = 3,15 мм)

v, м/с	$\dot{\varepsilon}_i$, с$^{-1}$	l_A / S_0	l_B / S_0
$1{,}0 \cdot 10^{-4}$	$7{,}7 \cdot 10^{-2}$	0,15	0,38
1,5	$2{,}2 \cdot 10^{2}$	0,15	0,33
10,0	$1{,}5 \cdot 10^{4}$	0,10	0,24
20,0	$3{,}0 \cdot 10^{4}$	0,09	0,24
30,0	$4{,}2 \cdot 10^{4}$	0,06	0,19

Примечание. Принятые обозначения размеров – по рис. 7.10, *б*.

Как следует из рис. 7.10, в зоне ОПД наблюдается значительное повышение твердости (примерно в два раза) по сравнению с исходным значением, вследствие деформационного упрочнения металла.

В работе В.П. Смолянинова и др. рекомендуется следующее

эмпирическое соотношение для определения усредненных размеров дефектного участка заготовки и соответственно ОПД:

$$l_{ср} / S_0 = 0{,}44 + 0{,}87\, z / S_0. \qquad (7.8)$$

Распределение степени деформации e_i (интенсивности деформации ε_i) и интенсивности напряжений σ_i по сечению ОПД неоднородно, так же как и распределение твердости *HV*. По мере удаления от поверхности разделения (вершины режущей кромки пуансона) σ_i понижается до уровня предела текучести исходного материала $\sigma_{0,2}$ (σ_T) на границе ОПД.

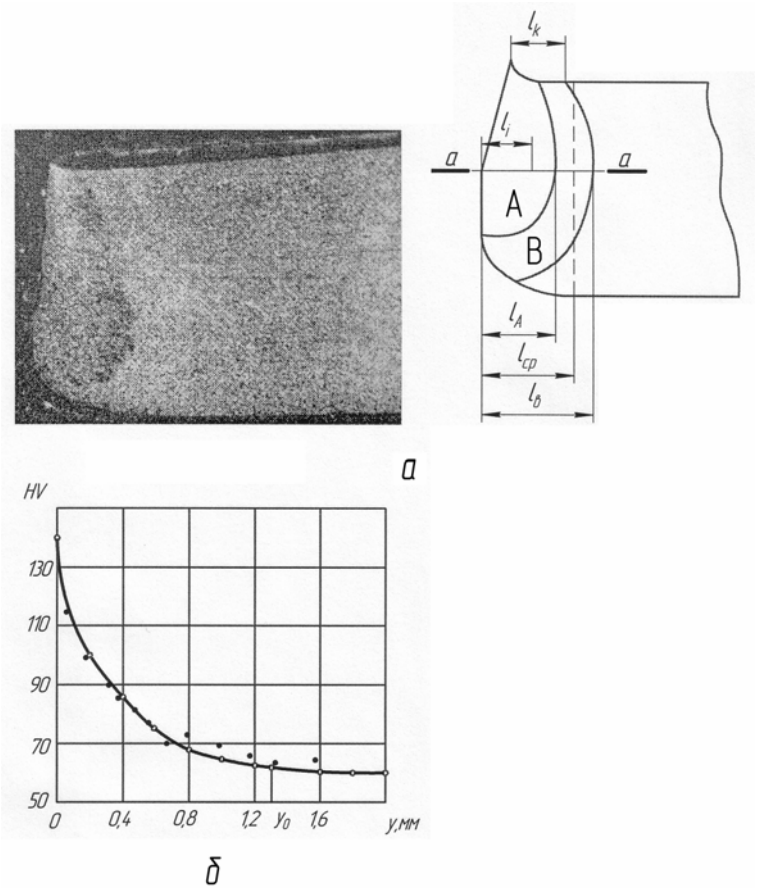


Рис. 7.10. Микроструктура материала заготовки в зоне ОПД после вырубки и рекристаллизационного отжига, схема ОПД (*а*) и распределение микротвердости

по сечению *а – а* ОПД (*б*)

Интенсивность деформации ε_i в зоне поверхности разделения вырубленной детали при $z / S_0 = 0{,}05\ldots0{,}07$ примерно одинакова и составляет около 0,30, с увеличением z / S_0 до 0,10 повышается на 16%, а при увеличении z / S_0 до 0,15 ε_i – на 58% и превышает значение $e_i > 0{,}40$.

Величину степени деформации при вырубке и пробивке

можно приближенно оценить по уменьшению площади среза:

$$\psi_i = (F_0 - F_i) / F_0, \tag{7.9}$$

где $F_0 = L \cdot S_0$; $F_i = L\,(S_0 - h_i)$; h_i – глубина внедрения инструмента в заготовку. В результате получим $\psi_i = h_i / S_0$ и в момент начала разрушения $\psi_m = h_m / S_0$.

Принимая во внимание, что в зоне ОПД на срединной (по толщине) поверхности заготовки деформация плоская ($\varepsilon_r > 0$, $\varepsilon_z < 0$, $\varepsilon_\theta = 0$, $\nu_\varepsilon = 0$), запишем

$$e_i = K_e \frac{2}{\sqrt{3}}\ \ln\frac{1}{1-\psi_m}, \tag{7.10}$$

где $K_e \geq 1{,}0$ – коэффициент, учитывающий немонотонность процесса (в первом приближении можно принять $K_e = 1$).

Величина h_m/S_0 определяется по справочным данным. Напряженное состояние заготовки в зоне ОПД на срединной поверхности принимается также плоским ($\sigma_r > 0$, $\sigma_z < 0$, $\sigma_\theta = 0$, $K = 0$). Согласно феноменологической теории разрушения, в процессе пластической деформации в зоне ОПД происходит накопление поврежденности металла, завершающееся формированием макродефектов значительной протяженности и образованием магистральных трещин, идущих от режущих кромок пуансона и матрицы.

Для оценки степени поврежденности металла вводят коэффициент использования запаса (ресурса) пластичности ω_i. Принимаем, что в момент достижения максимального усилия деформирования $P_{\max}$ происходит потеря устойчивости пластического деформирования с локализацией деформации по плоскостям сдвига. В зоне ОПД

$$\sigma_i = \sigma_{iy} = f(e_{iy}); \quad e_{iy} \cong \varepsilon_{i\,y} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{1}{1-\psi_m};$$

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \sigma_{iy} / \sqrt{3}; \; \omega_{iy} = \left(\frac{e_{iy}}{e_{ip}} \right)^a, \qquad (7.11)$$

где a = 1,5…2,0 – коэффициент, учитывающий влияние схемы напряженного состояния на интенсивность накопления поврежденности металла. Для случая сдвига $e_{ip} = 2\,\varepsilon_{ip}$, где ε_{ip} – интенсивность деформации в момент разрушения при испытании образцов на растяжение.

Из приведенного анализа следует, что применение для последующей вытяжки нетермообработанных вырубленных заготовок с накопленной значительной поврежденностью металла в зоне поверхности среза может сопровождаться при вытяжке появлением продольных трещин в зоне кромок.

Эффективными способами предотвращения растрескивания кромок могут служить рекристаллизационный отжиг вырубленных заготовок, зачистка после вырубки, обрезка края вытянутых заготовок.

Оценка качества вырубаемых заготовок выполняется по критериям соответствия формы:

$$\Phi_1 = h_п / S_0; \; \Phi_2 = x / S_0; \; \Phi_3 = h / S_0; \qquad (7.12)$$

$$\Phi_4 = \psi, \text{ град}; \; \Phi_5 = \frac{d_м - d}{d_м} 100\%,$$

где $h_п$, x, h, ψ, d – согласно рис. 7.8, *д*; $d_м$ – диаметр пояска матрицы (исполнительный размер).

Исследованиями авторов установлено, что наиболее существенное влияние на указанные критерии оказывают следующие факторы: относительный односторонний зазор z/S_0, свойства исходного материала ε_{iy}, ε_{ip}, скорость деформации $\dot{\varepsilon}_i$. Установлено, что с увеличением z/S_0 для всех исследованных материалов и при различных скоростях деформации Φ_1 уменьшается, а критерии Φ_2, Φ_3, Φ_4 возрастают (рис. 7.11).

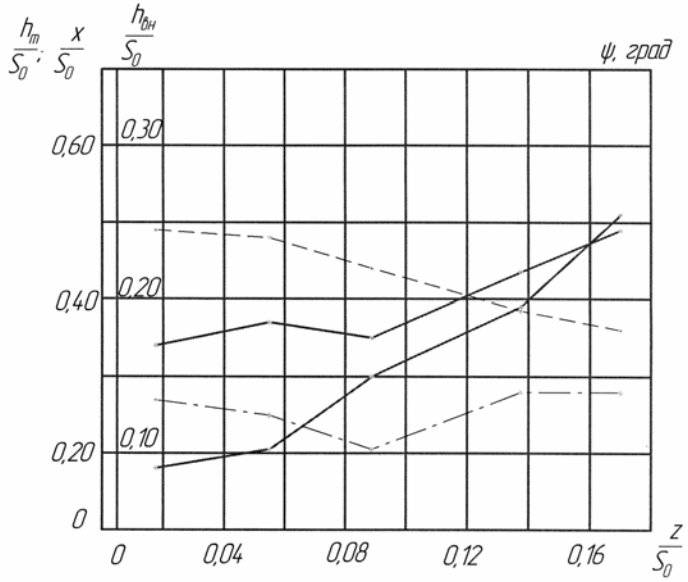


Рис. 7.11. Влияние относительного зазора на критерии соответствия формы вырубаемой заготовки (материал – Л62, $\dot{\varepsilon}_i = 2{,}2 \cdot 10^2\ с^{-1}$)

С увеличением характеристик пластичности (ε_{ir}) штампуемого материала увеличиваются $Ф_1$, величина угла скола $Ф_4$, утяжка $Ф_2$ и прогиб $Ф_3$ заготовки. Увеличение скорости деформации в интервале $10^{-1}\ldots10^3$ приводит к уменьшению числовых значений критериев $Ф_1$, $Ф_4$ и к увеличению $Ф_2$, $Ф_3$.

При использовании так называемых оптимальных зазоров трещины, развивающиеся на стадии разрушения от режущих кромок пуансона и матрицы, совпадают по направлению, что обеспечивает удовлетворительное качество поверхности среза заготовки (без заусенцев, значительных утяжин, с формированием «блестящего» пояска) и наименьшее сопротивление срезу (рис. 7.12, *а*). Уменьшение зазора по сравнению с его оптимальным значением приводит к несовпадению макротрещин по направлению (рис. 7.12, *б*) и к образованию некачественной поверхности среза с поясками дополнительных срезов перемычек между трещинами и заусенцами.

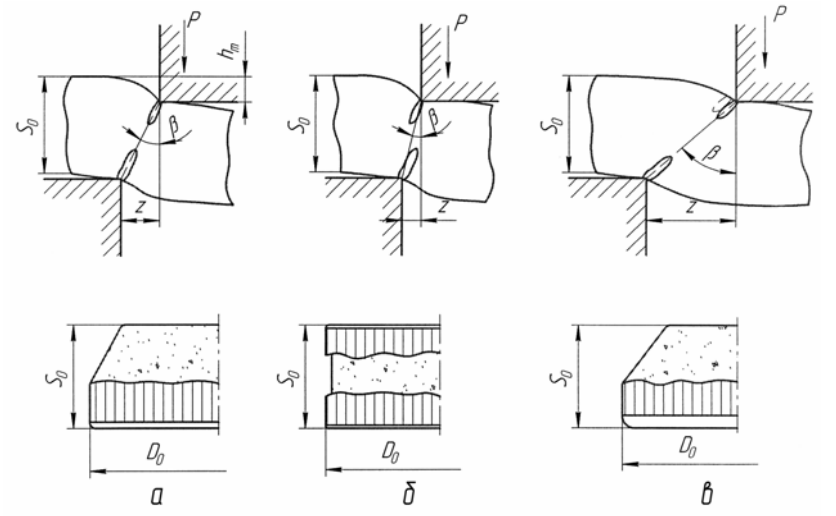


Рис. 7.12. Влияние величины зазора на характер разрушения заготовки при вырубке: *а* – оптимальный зазор; *б* – зазор меньше оптимального; *в* – зазор больше оптимального

В то же время с уменьшением зазора уменьшается величина изгибающего момента M_P (7.1) и, соответственно, прогиб и утяжина заготовки, но сопротивление срезу $\sigma_{ср} = \tau_{max}$ и технологическое усилие P возрастают. С уменьшением зазора по сравнению с его оптимальным значением повышается износ поверхностей инструмента ввиду увеличения сил трения. Увеличение зазора сверх оптимального значения сопровождается, в особенности при малых толщинах заготовок, образованием торцового заусенца, значительной утяжины, появлением трещин – надрывов на свободной поверхности (показано пунктиром на рис. 7.12, *в*), повышением сопротивления срезу материала заготовки и технологических усилий

Пробивка затравочных отверстий имеет некоторые особенности по сравнению с вырубкой. Технология их получения зависит от следующих факторов:

- положения осей затравочных отверстий относительно осей деталей (параллельности или непараллельности);
- относительного диаметра затравочных отверстий $d_{зо}/S_п$ ($d_{зо}$ – диаметр затравочного отверстия; $S_п$ – толщина пробиваемой перемычки);

• относительного расстояния между осями затравочных отверстий $b/d_{зо}$ (b – расстояние между осями затравочных отверстий);

• механических свойств материала детали (заготовки) на участках пробиваемых отверстий.

При наклонном расположении осей, малых относительном диаметре $d_{зо}/S_п \leq 1{,}0$ и относительном расстоянии между осями соседних отверстий $b/d_{зо} \leq (2\ldots3)S_п/d_{зо}$ и при расстоянии от стенки детали до края отверстия $C \leq r + 0{,}5S_п$ (где r – радиус сопряжения стенки и дна детали) затравочные отверстия рекомендуется получать сверлением, а в остальных случаях – пробивкой.

Пробивка затравочных отверстий характеризуется малыми относительными диаметрами пробиваемых (глубоких) отверстий и незамкнутым контуром режущих кромок матриц-стоек.

Ограничение нижних пределов относительных диаметров $d_{зо}/S_п$ при пробивке определяется жесткими условиями работы пробивных пуансонов. При малом диаметре пуансона и сравнительно большой длине его свободной незакрепленной части возможны продольный изгиб ввиду потери устойчивости и разрушение.

Величина сжимающего напряжения $\sigma_{сж}$, воспринимаемого пуансоном, может быть определена из условий равенства усилий:

$$\sigma_{сж} \cdot \frac{\pi d_{зо}^{\,2}}{4} = K\pi d_{зо} S_п \sigma_{ср} = P_{max},$$

откуда

$$\sigma_{сж} = \frac{4KS_п}{d_{зо}}\sigma_{ср}. \qquad (7.13)$$

Условие прочности пуансона на сжатие при отсутствии эксцентриситета приложения нагрузки запишется в виде неравенства

$$\sigma_{сж} \leq [\sigma_{сж}] = \frac{(\sigma_в)_{сж}}{K_{\sigma_в}}, \qquad (7.14)$$

где $[\sigma_{сж}]$ – допускаемое напряжение на сжатие материала инструмента; $(\sigma_в)_{сж}$ – предел прочности материала инструмента после закалки и отпуска; $K_{\sigma_в}$ – коэффициент запаса прочности ($K_{\sigma_в} = 2\ldots3$). Как видно из формулы (7.13), нагрузка на пуансон возрастает с увеличением относительной толщины пробиваемого отверстия $S_п/d_{зо}$ и сопротивления срезу $\sigma_{ср}$ материала пробиваемого участка заготовки (перемычки). Так, например, при пробивке от-

верстия в дне детали, выполненной из стали 18ЮА, принимаем $\sigma_{ср} = 412$ МПа, $[\sigma_{сж}] = 1960$ МПа, $K = 1{,}3$.

Тогда из формулы (7.13) следует, что допустимое значение относительной толщины пробиваемого отверстия будет равно: $S_п/d_{зо} \le 0{,}91$. При наличии смещения оси пуансона относительно оси матрицы критическое значение $S_п/d_{зо}$ по сравнению с предыдущим случаем увеличивается ввиду появления дополнительных изгибающих напряжений, действующих на пуансон совместно со сжимающими напряжениями.

Кроме того, при пробивке затравочных отверстий серьезным ограничением является обеспечение прочности пуансонов на продольный изгиб в соответствии с условием

$$P_{max} \le \frac{1}{K_у} P_{кр}, \qquad (7.15)$$

где $P_{кр} = \eta \dfrac{EJ}{l^2}$ – критическая нагрузка; $K_у$ – коэффициент запаса устойчивости (для закаленной стали принимается $K_у = 2\ldots3$); J – осевой момент инерции (для цилиндрического пуансона $J = \dfrac{\pi d^4}{64} \cong 0{,}05 d^4$); l – длина свободной, незакрепленной части пуансона; E – модуль нормальной упругости (для инструментальной стали $E = 2{,}1\cdot10^4\ldots2{,}2\cdot10^4$ кгс/мм^2); η – коэффициент, учитывающий влияние условий закрепления пуансона, характера нагружения и изменения сечения пуансона по длине на $P_{кр}$.

Из условия прочности на продольный изгиб устанавливается соотношение между допустимой относительной длиной свободной незакрепленной части пуансона и относительным диаметром пробиваемого отверстия, например, для цилиндрического пуансона:

$$\frac{l}{d_п} \le 0{,}10 \left(\frac{d_п}{S_п} \frac{E}{\sigma_{ср}} \right)^{\frac{1}{2}}$$ – без промежуточной опоры (рис. 7.13);

(7.16а)

$$\frac{l}{d_п} \le 0{,}11 \left(\eta \frac{d_п}{S_п} \frac{E}{\sigma_{ср}} \right)^{\frac{1}{2}}$$ – с промежуточной опорой ($d_п \cong d_{зо}$) (рис.

7.14).

(7.16б)

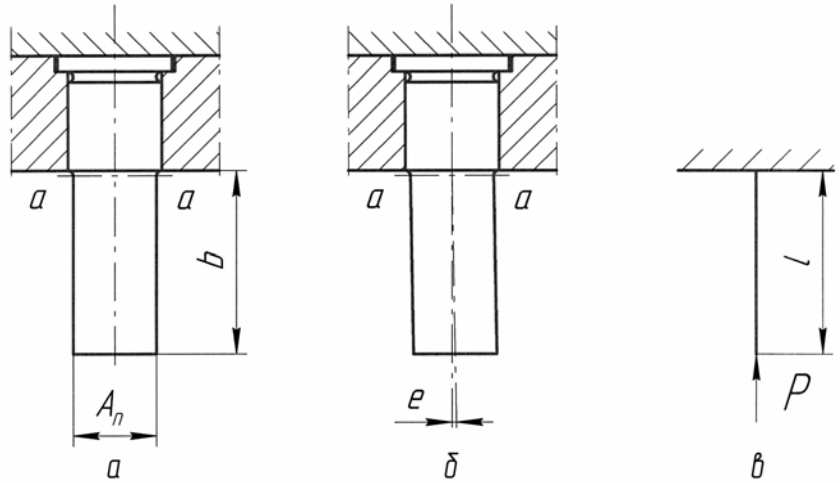


Рис. 7.13. Схема установки и нагружения пуансона при отсутствии направляющей втулки (плиты): *а* – схема установки пуансона при отсутствии смещения его оси относительно оси матрицы; *б* – схема искривления пуансона при смещении

его оси относительно оси матрицы; *в* – расчетная схема

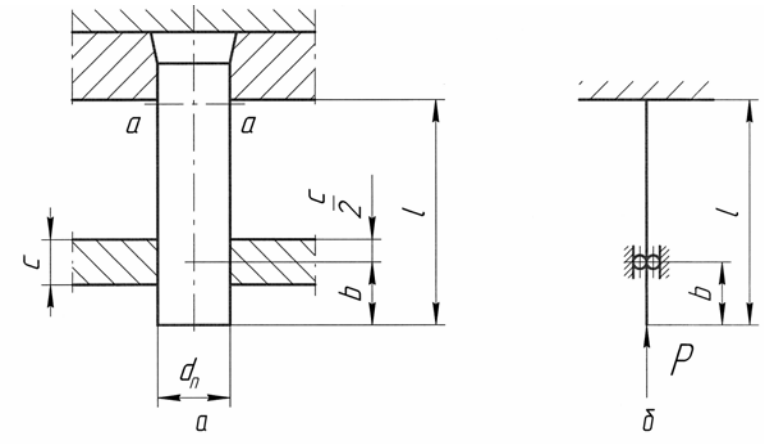


Рис. 7.14. Схема установки и нагружения пуансона с применением направляющей втулки (плиты): *а* – схема установки пуансона; *б* – расчетная схема

На основании изложенного можно заключить, что уменьшить относительный диаметр пробиваемого отверстия $d_{зо}/S_п$ можно применяя более прочные материалы для изготовления пуансонов или повышая их жесткость за счет скользящих направляющих втулок-подпоров, или выбирая оптимальную форму сечения (например, в виде квадрата, шестигранника). Некоторого уменьшения напряжений в пуансоне можно добиться за счет применения скошенных режущих кромок пуансонов и уменьшения технологических усилий.

Штамп для пробивки затравочных отверстий (рис. 7.15) состоит из двух узлов: матрицы (стойки) *1* и патрона *2* с пуансонами *3*. Матрица (стойка) для пробивки затравочных отверстий представляет собой стержень из инструментальной углеродистой стали У12, выполненный по форме внутренней поверхности гильзы и имеющий на боковой поверхности две канавки *а*, которые и образуют режущие кромки незамкнутого контура.

Патрон для крепления пуансонов состоит из корпуса и втулки, удерживающей малую игольную камору с двумя пуансонами (иглами). Пуансоны фиксируются штифтом и винтом и не перемещаются вдоль оси игольной каморы. Малая игольная камора скользит в большой, установленной в подпружиненной втулке.

Большая игольная камора служит для точного центрирования пуансонов относительно капсюльного гнезда гильзы и одновременно выполняет функцию втулки-подпора, повышающей жесткость (устойчивость) пуансонов.

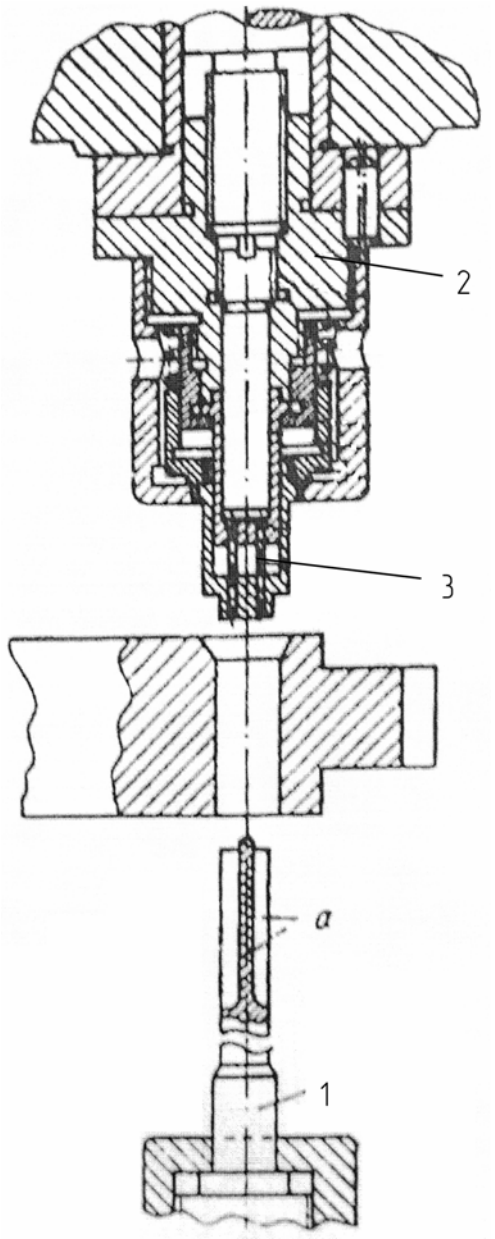


Рис. 7.15. Штамп для пробивки затравочных отверстий в гильзах: *1* – матрица; *2* – патрон; *3* – пуансон

Применение незамкнутого контура режущих кромок матрицы приводит к неполному отделению металла, идущего в отход, в особенности при их затуплении и увеличенном угле скоса пуансона. Указанное обстоятельство требует введения дополнительной операции по снятию неотделившегося отхода (крупки) специальным инструментом. Последовательность получения затравочных отверстий предполагает применение двух операций: пробивки отверстий и удаления отходов (крупки) и заусенцев. Устройство для отделения отходов и снятия заусенцев представляет собой вращающуюся чашечку с зубцами на торцевой поверхности. При соприкосновении дна полуфабриката по наружной поверхности с чашечкой происходит проворот полуфабриката на неподвижной матрице (стойке) и снятие заусенцев и крупки режущими кромками матрицы.

7.1.3. Обрезка

В патронном производстве применяют способы обрезки в штампах на прессах, дисковыми ножами и резцами на станках и автоматических роторных линиях (АРЛ).

Обрезку плоского фланца для деталей любых размеров и при любом типе производства выполняют ступенчатым пуансоном, состоящим из рабочего участка и ловителя (рис. 7.16, *а*), диаметр которого на 0,2…0,3 мм меньше внутреннего диаметра обрезаемой заготовки. Диаметр пуансона $d_п$ равен разности наружного диаметра фланца вытянутой заготовки и удвоенного припуска на обрезку $2\Delta D$ (табл. 7.2).

При обрезке по схеме, представленной на рис. 7.16, *б*, реализуется процесс комбинированной совмещенной разделительно-формоизменяющей штамповки «вытяжка-обрезка». В этом случае диаметр матрицы равен наружному диаметру вытянутой заготовки, а пуансон имеет уступ с диаметром $d_у$, несколько меньшим диаметра пояска матрицы.

При перемещении пуансона происходит вытяжка заготовки, а в конце рабочего хода – обрезка (откуска) ее неровного края, после чего пуансон проталкивает отштампованную заготовку (деталь) через матрицу, а отход в виде кольца сбрасывается с пуансона и удаляется из штампа.

Диаметр уступа пуансона примерно равен: $d_у = d_м +$ + 0,03...0,05 мм, где $d_м$ – диаметр пояска матрицы.

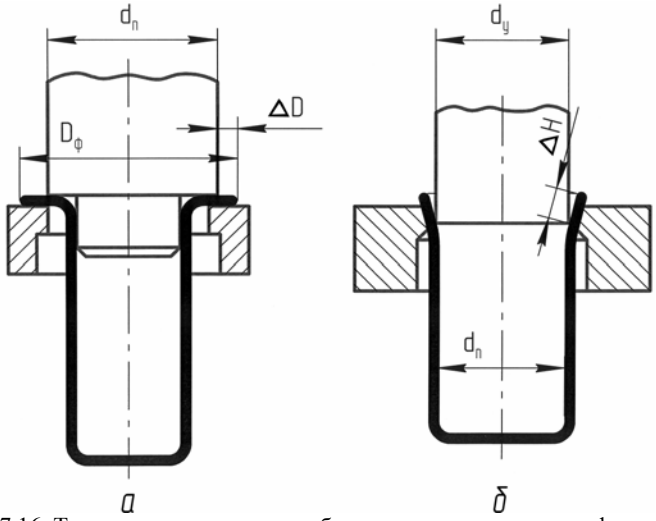


Рис. 7.16. Технологические схемы обрезки в штампе плоского фланца (*а*)

и краевой части (*б*) заготовки без фланца

Таблица 7.2

Припуски на обрезку Δ*D* фланца деталей

Диаметр фланца $D_ф$, мм	Относительный диаметр фланца $D_Ф/d$			
	до 1,5	1,5…2,0	2,0…2,5	2,5…2,8
25	1,6	1,4	1,2	1,0
50	2,5	2,0	1,8	1,6
100	3,5	3,0	2,5	2,2
150	4,3	3,6	3,0	2,5
200	5,0	4,2	3,5	2,7
250	5,5	4,6	3,8	2,8
300	6,0	5,0	4,0	3,0

Обрезка, совмещенная с вытяжкой, не обеспечивает высокого качества поверхности среза и применяется на промежуточных операциях. Определенную трудность представляет удаление отходов в виде колец.

Технологические схемы обрезки дисковыми ножами и отрезными резцами показаны на рис. 7.17.

При обрезке полых заготовок по схеме «*а*» обрезаемое изделие устанавливается на упорные ролики с прижимом донной части до упора. Принудительно вращающийся дисковый нож приводит во

вращение заготовку и при движении поперечной подачи отделяет отход в виде кольца, соответствующий припуску на обрезку.

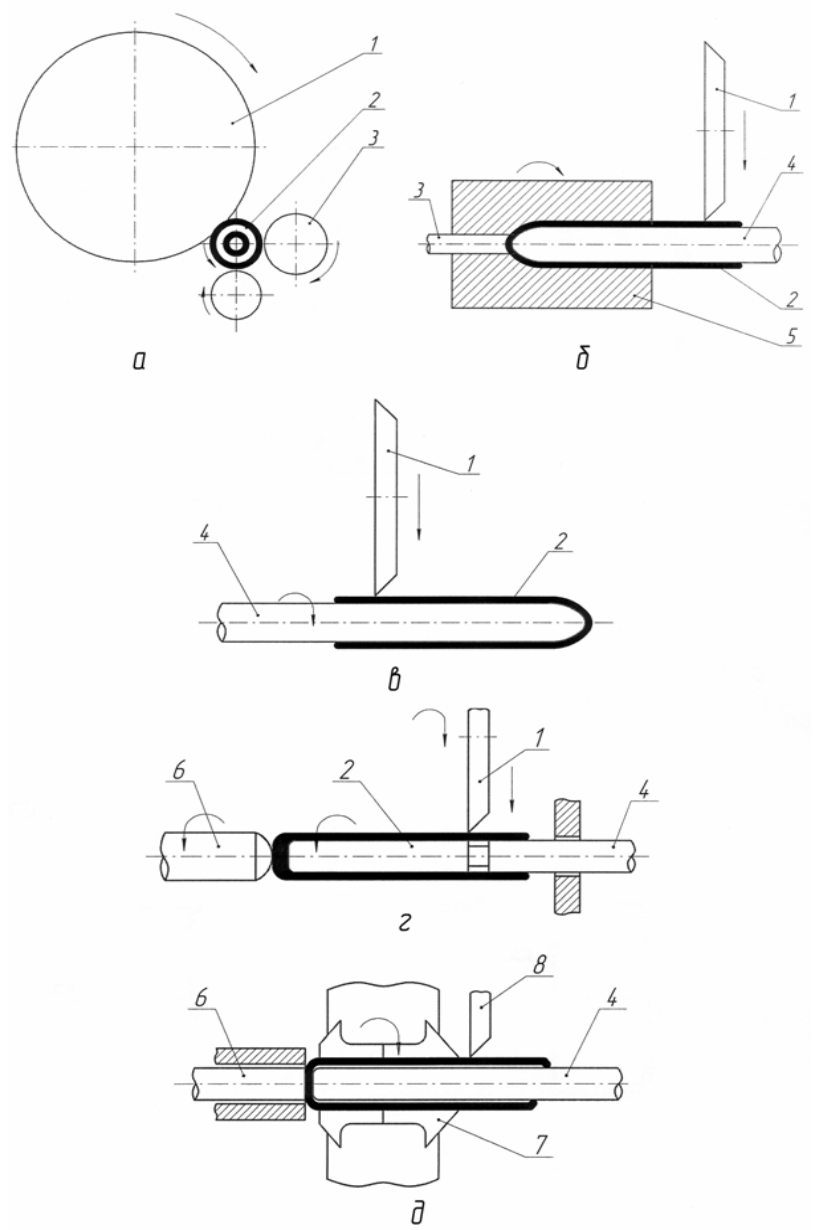


Рис. 7.17. Технологические схемы обрезки вытянутых заготовок диско-

выми

ножами (*а*, *б*, *в*, *г*) и отрезным резцом (*д*): *1* – дисковый нож; *2* – заго-

товка;

3 – опорный ролик; *4* – оправка; *5* – матрица; *6* – прижим; *7* – цанга; *8* –

резец

При обрезке по схеме «*б*» обрезаемая заготовка заталкивается вращающимся стержнем-оправкой во вращающуюся с той же угловой скоростью матрицу и фиксируется заталкивателем-прижимом. Обрезка выполняется дисковым ножом, которому сообщается от заготовки вращение при его поперечной подаче.

Технологическая схема «*в*» есть разновидность предыдущей схемы и применяется для обрезки свинцовых рубашек.

При обрезке по схеме «*г*» обрезаемая заготовка надевается на вращающуюся оправку, имеющую на торце насечку. Вращающийся упор прижимает заготовку к торцу оправки и вращает заготовку вместе с оправкой. Дисковый нож, имеющий принудительное вращение или вращение от обрезаемой заготовки, обрезает кромку при поперечной подаче.

Технологическая схема «*д*» предусматривает метод резания с удалением стружки.

В качестве инструмента применяют отрезные дисковые или призматические резцы. Обрезка выполняется на горизонтальных обрезных станках или АРЛ (рис. 7.18).

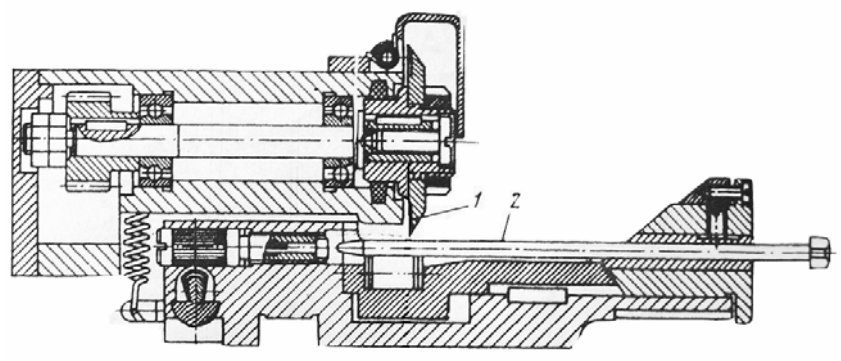


Рис. 7.18. Схема блока АРЛ для обрезки пульной оболочки: *1* – нож; *2* –

оправка

При резании без снятия стружки дисковый нож имеет скорость резания 8…12 м/с, заготовка – 2,5…3,5 м/с, при резании резцом скорость резания υ = 0,75…0,92 м/с. Величина подачи на оборот составляет:

- 0,005…0,006 мм при обрезке дисковым ножом латунных, биметаллических и стальных заготовок;
- 0,004…0,005 мм при обрезке дисковым ножом свинцовых заготовок;
- 0,02…0,025 мм при обрезке резцом латунных, биметаллических и стальных заготовок.

7.2. Расчет технологических параметров

7.2.1. Технологические параметры

Основные параметры процессов вырубки и пробивки:

- условное $\sigma_{ср}$ сопротивление материала срезу;
- относительная глубина внедрения пуансона в металл до начала появления трещин h_m/S_0 (h_m – 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 материала 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.

$$\sigma_{ср} = \frac{P_{max}}{F} = \frac{P_{max}}{LS_0},$$

где L – длина периметра вырубаемой детали или пробиваемого отверстия (при вырубке и пробивке круглых деталей и отверстий $L = \pi d$, где d – диаметр детали или отверстия).

Значения $\sigma_{ср}$ назначают по опытным данным (табл. 7.3, рис. 7.19), а также могут быть определены по формуле $\sigma_{ср}$ = (0,70 – 0,85) $\sigma_в$.

Большие значения коэффициента назначаются для тонких материалов (S_0 = 0,5…2,0 мм) при минимальных значениях оптимальных зазоров и более высоких значениях относительных толщин штампуемых деталей S_0/d. Влияние относительной толщины S_0/d на сопротивление срезу $\sigma_{ср}$ для сталей (S_0 = 4…10 мм) может быть учтено следующими формулами:

$$\sigma_{ср} = \left(1{,}2\frac{S_0}{d} + 0{,}6\right)\sigma_в \text{ для } \frac{2z}{S_0} = 0{,}15;$$

$$\sigma_{ср} = \left(1{,}43\frac{S_0}{d} + 0{,}62\right)\sigma_в \text{ для } \frac{2z}{S_0} = 0{,}1;$$

$$\sigma_{ср} = \left(2\frac{S_0}{d} + 0{,}62\right)\sigma_в \text{ для } \frac{2z}{S_0} = 0{,}05.$$

Таблица 7.3

Сопротивление срезу $\sigma_{ср}$ и относительная глубина внедрения пуансона в металл до начала разрушения h_m/S_0 для различных металлов

Материал	Состояние материала					
	Отожженный			Наклепанный		
	$\sigma_{ср}$, МПа (кгс/мм^2)	h_m/S_0, %		$\sigma_{ср}$, МПа (кгс/мм^2)	h_m/S_0, %	
		S_0 < <4 мм	S_0 > >4 мм		S_0 < <4 мм	S_0 > >4 мм
Сталь 08	245-274,4 (25-28)	55-60	--	313,6-343 (32-35)	50	--
Сталь 10КП, 15КП, Ст.I	274,4-294 (28-30)	50-55	--	343-372,4 (35-38)	50	--
Сталь 20, Ст.2	294-313,6 (30-32)	50	45	372,4-411,6 (38-42)	45	38
Сталь 25, Ст.3	313,6-343 (32-35)	47	40	411,6-441 (42-45)	40	28
Сталь 35, Ст.5	392-441 (40-45)	40	27	490-539 (50-55)	30	17
Медь М1, М2, М3	176,4-215,6 (18-22)	55	--	245-274,4 (25-28)	30	--
Латунь Л62, Л68	215,6-274,4 (22-28)	55-60	50	343-392 (35-40)	20-30	20
Алюминий АД, АДI	68,6-88,2 (7-9)	55-65	60	107,8-147 (11-15)	40-50	30

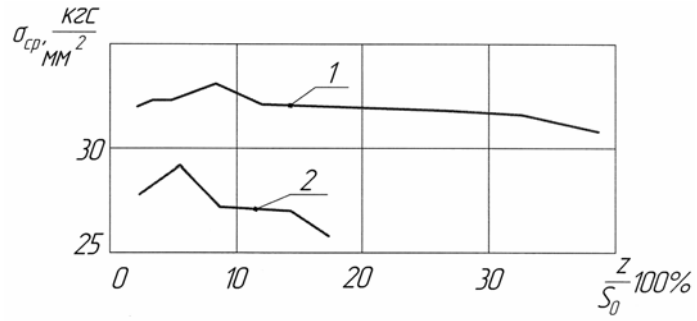


Рис. 7.19. Влияние относительного зазора на сопротивление срезу стали 18ЮА (*1*) и биметалла 1 (*2*)

Относительная глубина внедрения пуансона в металл до начала разрушения h_m/S_0 характеризует пластические свойства материала на разделительных операциях. Величина h_m соответствует моменту достижения максимального усилия вырубки (пробивки) P_{max} (см. рис. 7.8, *а*) и определяет высоту блестящего пояска на готовой детали $h_п$ (рис. 7.8, *д*): $h_п/S_0 \cong h_m/S_0$. Значения h_m/S_0 устанавливают по опытным данным (табл. 7.3).

Максимальное усилие вырубки (пробивки) P_{max} соответствует внедрению пуансона в заготовку на величину h_m и началу ее разрушения (рис. 7.8, *а*, *в*).

Усилия проталкивания $P_{пр}$ и съема $P_{сн}$ 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 при выборе буферных устройств, расчета прочности крепления пуансона.

Потребные для выполнения разделительных операций и выбора прессового оборудования усилия P при однопозиционной штамповке назначаются в соответствии с формулами:

$P = P_{max} + P_{пр}$ – при работе на провал с жестким съемом полосы, ленты;

$P = P_{max} + P_{пр} + P_{сн}$ – при работе на провал с пружинным съемником;

$P = P_{max} + P_{вт} + P_{сн}$ – при работе с возвратом деталей или отходов в исходное положение после вырубки, пробивки, где $P_{пр}$ –

усилие проталкивания детали или отхода через отверстие матрицы; $P_{сн}$ – усилие снятия детали, отхода с пуансона; $P_{вт}$ – усилие выталкивания детали или отхода из матрицы.

При многопозиционной штамповке общее максимальное усилие P_{Σ} принимается равным сумме всех усилий, возникающих на отдельных позициях штампа:

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{m} P_i,$$

где m – количество позиций штампа, на которых осуществляется одновременная штамповка; P_i – максимальное операционное усилие на i -й позиции штампа.

Полная работа формоизменения равна сумме работ пластической деформации $A_{пл}$ и разрушения $A_р$ при резке, а также работы трения $A_{тр}$, затрачиваемой на перемещение вырубленной детали относительно отхода и на проталкивание ранее вырубленных деталей через окно матрицы (см. рис. 7.8, *а*), и определяется интегральным выражением

$$A = \int_{0}^{hi} P_i dh\,,$$

где h_i – значение переменной величины углубления пуансона в металл, мм; P_i – усилие деформирования, соответствующее углублению h_i, кгс.

Полная работа может быть определена опытным путем по площади диаграммы «усилие – ход инструмента» P–h (см. рис. 7.8, *а*) с учетом масштабов записи усилия P и перемещения h, т.е. $A = \mu_p\, \mu_h\, F_{ph}$, где μ_p – масштаб усилия, Н/мм (кгс/мм) диаграммы; μ_h – масштаб перемещения, мм/мм диаграммы; F_{ph} – площадь диаграммы, заключенная между кривой усилия и осью абсцисс, мм^2.

Основные факторы, влияющие на параметры процессов вырубки и пробивки:

- механические свойства материала исходной заготовки ($\sigma_в$, $S_к$, ψ, $\varepsilon_{iр}$);
- 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 (табл. 7.4).

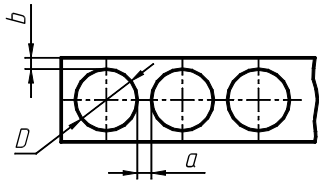
С повышением прочностных характеристик материала заготовки ($\sigma_в$, $S_к$) возрастают сопротивление срезу $\sigma_{ср}$ и максимальное усилие деформирования P_{max}; с повышением показателей пластичности увеличивается относительная глубина внедрения пуансона в металл h_m/S_0.

С увеличением толщины исходной заготовки S_0 растет максимальное усилие вырубки, пробивки P_{max}, уменьшается сопротивление срезу $\sigma_{ср}$.

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 (3–15%) (табл. 7.5, 7.6).

Таблица 7.4

Минимальные размеры перемычек при однорядной вырубке металла

S, мм	$\sigma_в$, МПа (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	≤ 245 (25)	1,5	2,0	1,7	2,2	2,0	2,5	2,2	2,8
	> 245 (25)	1,0	1,3	1,2	1,5	1,5	1,7	1,8	2,0
0,2-0,5	≤ 245 (25)	1,3	1,8	1,5	2,0	1,7	2,2	2,0	2,5
	> 245 (25)	0,8	1,2	1,0	1,5	1,2	1,7	1,5	2,0
0,5-1,0	≤ 245 (25)	1,0	1,5	1,2	1,7	1,5	2,0	1,8	2,3
	> 245 (25)	0,7	1,1	1,0	1,3	1,2	1,5	1,4	1,8
1,0-1,5	≤ 245 (25)	1,3	1,8	1,5	2,0	1,7	2,2	2,0	2,5
	> 245 (25)	1,0	1,5	1,2	1,7	1,5	2,0	1,8	2,3

1,5-2,0	Для всех штампуемых металлов	1,5	2,0	1,7	2,2	2,0	2,5	2,2	2,8
2,0-2,5		1,8	2,3	2,0	2,5	2,3	2,8	2,5	3,0
2,5-3,0		2,0	2,5	2,2	2,7	2,5	3,0	2,8	3,3
3,0-4,0		2,5	3,0	2,7	3,2	3,0	3,5	3,2	3,8
4,0-5,0		3,0	3,5	3,2	3,7	3,5	4,0	3,7	4,3
5,0-6,0		3,5	4,0	3,7	4,3	4,0	4,5	4,2	4,8
6,0-7,0		4,0	4,5	4,2	4,8	4,5	5,0	4,8	5,3
7,0-8,0		4,5	5,0	4,7	5,3	5,0	5,5	5,3	5,8
8,0-9,0		5,0	5,5	5,3	5,8	5,5	6,0	5,8	6,3
9,0-10,0		5,5	6,0	5,7	6,3	6,0	6,5	6,3	6,8

Примечание. При многорядной штамповке ширина перемычек может быть в 4-5 раз меньше указанной в таблице.

Таблица 7.5

Оптимальные технологические зазоры (двусторонние), применяемые в общем машиностроении для различных металлических материалов

S_0, мм	$\sigma_в$, кгс/мм^2					
	До 20		20-40		40-60	
	$2z_{опт}$					
	% S	мм	% S	мм	% S	мм
1	2	3	4	5	6	7
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

Окончание табл. 7.5

1	2	3	4	5	6	7
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	7-10	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		0,96-1,20		1,12-1,36
9,0		1,00-1,30		0,08-1,35		1,26-1,53
10,0				1,20-1,50		1,40-1,70
11,0	13-16	1,43-1,76	15-18	1,65-1,98	17-20	1,87-2,20
12,0		1,56-1,92		1,80-2,16		2,04-2,40

Примечание. Указанные зазоры рекомендуются для получения заготовок и готовых деталей.

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. 7.5, 7.6).

Таблица 7.6

Технологические зазоры для материалов отрасли, принятые на производстве

Материал	Стандарт на материал	Стандарт на полосы	S_0, мм	$2z$, мм
Латунь Л68	ГОСТ 15527-70	ГОСТ 931-70	2,54	0,10-0,25
Латунь Л70			8,40	0,25-0,60
Томпак Л90			0,60	0,02-0,06
Сталь 08КП	ГОСТ 803-66	ЧМТУ / ЦНИИЧМ 413-61	1,00	0,06-0,10
Сталь 11КП			1,37	0,14-0,15
Сталь Н18			1,37	0,14-0,20
Сталь 18ЮА			8,7	2,00-2,05
Биметалл 1 (сталь 18КП, томпак Л90)	ГОСТ 803-66 (сталь) ГОСТ 15527-70 (томпак)	ГОСТ 806-51	3,2	0,20-0,25
Биметалл 3 (сталь 11КП, томпак Л90)		ГОСТ 807-51	0,99	0,06-0,09

Примечание. Указанные зазоры рекомендуются для получения заготовок.

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.

Применение матриц с коническим профилем рабочей части 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. 7.20, *в*) рекомендуется выбирать в зависимости от толщины S_0 исходной заготовки:

S_0, мм	α, ′
От 0,1 до 0,5	10

От 0,5 до 1,0	15
От 1,0 до 2,0	20
От 2,0 до 4,0	30
От 4,0 до 6,0	45
Свыше 6,0	1°

При вырубке на провал в матрице этого типа происходит увеличение зазора после переточки, поэтому рекомендуется исходный технологический зазор z задавать несколько меньше оптимального $z_{опт}$, т.е. $z_{опт} \geq z \geq z_{опт} - h_м \operatorname{tg}\alpha$.

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:

S_0, мм	$h_м$, мм
До 0,5	3-5
От 0,5 до 1,0	5-8
Свыше 1,0	8-10

Угол β принимается от 3 до 5°. Резка металлов в штампах производится пуансоном, как правило, с углом резания δ = 90°. Пуансоны малого диаметра изготавливают с плоским торцем, а пуансоны большого диаметра – с выточкой (рис. 7.21, *а, б*). Для снижения работы резки и уменьшения усилия съема штампуемого материала пуансоны выполняют с углом поднутрения β = 3-5° (рис. 7.21, *в, г*). Применение пуансонов и матриц со скошенными режущими кромками (рис. 7.21, *д*, *е* и 7.20, *д*) значительно снижает максимальное усилие деформирования P_{max}.

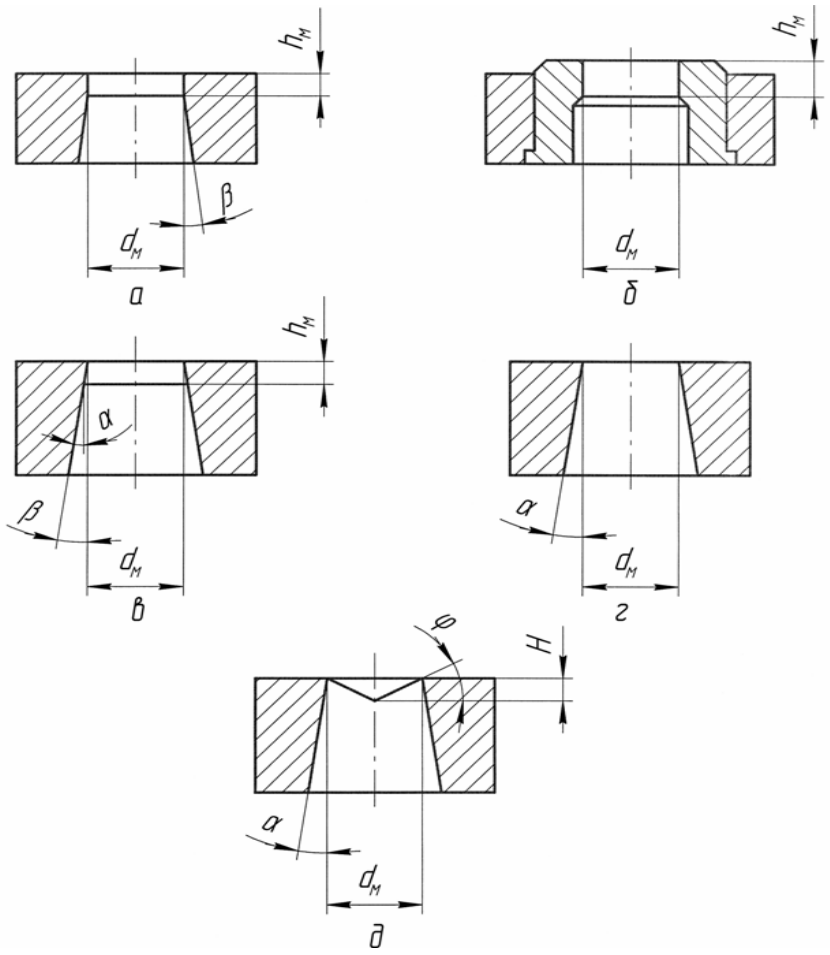


Рис. 7.20. Профили рабочей части матриц: *а*, *б* – с цилиндрическим пояском;

в – с коническим пояском; *г* – без пояска; *д* – со скосом режущей кромки

Для материалов толщиной до 3 мм принимается высота скоса $H = (1–2)S_0$, угол скоса $\varphi = 2–5°$, для материалов толщиной свыше 3 мм – $H = (2–3)S_0$, $\varphi = 5–8°$. При пробивке отверстий малого относительного диаметра $d/S_0 < 1{,}5$ в заготовке толщиной $S_0 > 4$ мм рекомендуется применять пробивные пуансоны с углом резания

δ = 110° (рис. 7.21 *д*, *е*). Для пробивки отверстий с большими относительными диаметрами $d/S_0 > 1{,}5$ в толстых материалах рекомендуют пуансоны с заостренным центром или вогнутой торцевой поверхностью (рис. 7.21, *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.

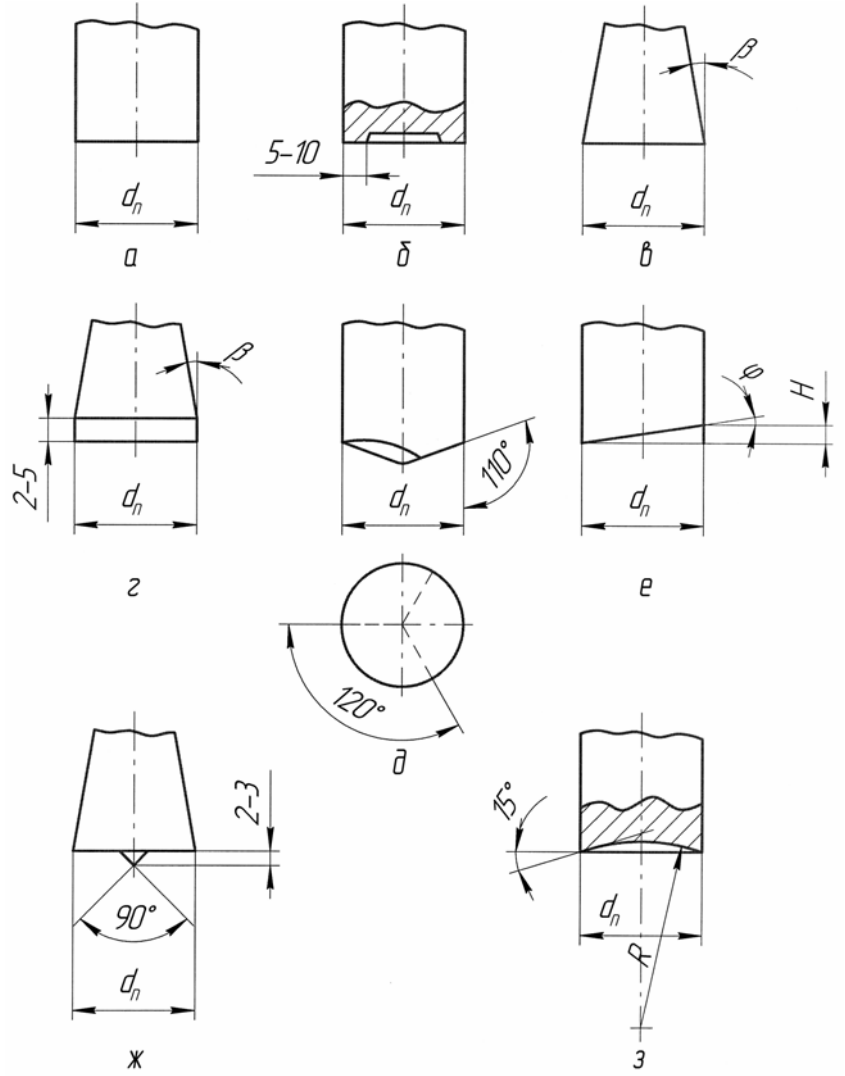


Рис. 7.21. Профили рабочей части пуансонов: *а* – с плоским торцем, без

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 139 до 423 двойных ходов в минуту (при скорости деформирования до 0,28–0,32 м/с) несущественно влияет на качество штампуемых деталей, но значительно уменьшает сопротивление срезу, максимальное усилие P_{max} и работу формоизменения A. Дальнейшее увеличение скорости деформирования до 25 м/с несущественно влияет на качество штампуемых деталей, в частности на параметр h_m/S_0, но заметно, в особенности для тонколистовых материалов, увеличивает максимальное усилие вырубки, пробивки (до 2,5 раза) и сопротивление срезу (табл. 7.7) и уменьшает работу формоизменения. Уменьшение работы формоизменения с ростом скорости процесса вызвано уменьшением пластически деформируемого объема металла и значительным повышением температуры в зоне ОПД. 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 7.7

Зависимость сопротивления срезу и максимального усилия вырубки (пробивки) от скорости процесса для биметалла I

v, м/с	$\dot{\varepsilon}_i$, I/с	$\sigma_{ср}$, МПа (кгс/мм^2)
$1 \cdot 10^{-4}$	$7{,}7 \cdot 10^{-2}$	279,3 (28,5)
$1 \cdot 10^{1}$	$1{,}47 \cdot 10^{4}$	563,5 (57,5)
$2 \cdot 10^{1}$	$2{,}94 \cdot 10^{4}$	700,7 (71,5)

Примечание. v – скорость деформирования; $\dot{\varepsilon}_i$ – скорость деформации.

7.2.2. 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. 7.20, 7.21).

При расчете исполнительных размеров рабочего инструмента один из пары инструментов пуансон-матрица, непосредственно влияющий на точность штампуемой детали, принимается за «основной». Его размеры определяются по номинальным размерам вырубаемой детали или пробиваемого отверстия с учетом допускаемых отклонений на изготовление детали или отверстия, степени и направления износа, 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 формулам

$A_{\text{м}} = (A_{\max} - \Pi_{\text{изн}} - \delta_{\text{у}})^{+T_{\text{м}}}$; $A_{\text{п}} = (A_{\text{м}} - 2z_{\min})_{-T_{\text{п}}}$ – при вырубке;

$A_{\text{п}} = (A_{\min} + \Pi_{\text{изн}} + \delta_{\text{у}})_{-T_{\text{п}}}$; $A_{\text{м}} = (A_{\text{п}} + 2z_{\min})^{+T_{\text{м}}}$ – при пробивке,

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; $\Pi_{\text{изн}}$ – припуск на износ «основного» рабочего инструмента; $\delta_{\text{у}}$ – 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:

$$\Pi_{\text{изн}} = 2z_{\max} - 2z_{\min} - T_{\text{м}} - T_{\text{п}}.$$

Величина упругой деформации $\delta_{\text{у}}$ учитывается при назначении размеров пробивных пуансонов при необходимости получения точных отверстий (7–9 квалитеты точности). Ее можно приближенно вычислить по формуле (S_0 = 4–5 мм, $d \leq 20$ мм)

$$\delta_{\text{у}} = 0{,}01K \cdot S_0 + K\frac{z^2}{S_0},$$

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, наименьшие значения коэффициента принимаются для нового, заточенного инструмента).

При изготовлении деталей невысокой точности величина $\delta_{\text{у}}$ не учитывается.

Размеры пуансона и матрицы при вырубке (пробивке) ограничивают одновременно допусками $T_{\text{м}}$ и $T_{\text{п}}$ на изготовление только в том случае, если допускаемое отклонение оптимального зазора для заданных толщины и механических свойств материала заготовки (см. табл. 7.5) по величине больше суммарного допуска на их изготовление, т.е.

$$(2z_{\max} - 2z_{\min}) \geq (T_{\text{м}} + T_{\text{п}}).$$

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.

Таблица 7.8

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	h6**									
0,1500-0,2000	h6**									
0,2000-0,3000				H9						
0,3000-0,6000				H9						
0,6000-2,0000				H9						

Свыше 2,0000		h9**

Примечания.* Допуск проставляется только на одной из рабочих деталей.

** Допуск проставляется на двух деталях: на матрице со знаком плюс, на пуансоне – со знаком минус. H6, h5 и т.д. – посадки в системе ЕСДП СЭВ (стандарты СТ СЭВ 144-75, СТ СЭВ 145-75).

Класс точности изготовления рабочего инструмента назначается в зависимости от номинального размера инструмента и принятого зазора (табл. 7.8).

Допуски на изготовление пуансона и матрицы выбираются по единой системе допусков и посадок ЕСДП СЭВ (стандарты СТ СЭВ 144-75 и СТ СЭВ 145-75).

7.2.3. Расчет технологических усилий и работы формоизменения

Расчет максимальных усилий вырубки и пробивки инструмента 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 деталей и отверстий круглой формы (рис. 7.22) рассчитываются по формулам

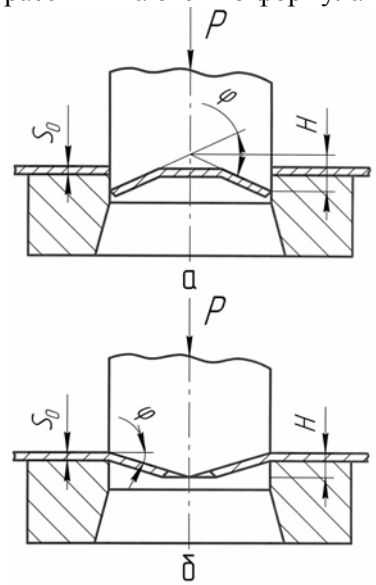


Рис. 7.22. Технологические схемы процесса пробивки пуансоном со скошенными вовнутрь (*а*) и наружу (*б*) режущими кромками

$$P_{\max} = 2{,}5 d S_0 \sigma_{\text{ср}} K \left(1 + 0{,}1 \frac{H}{S_0 K}\right) \arcsin \frac{S_0}{H} \text{ при } H > S_0,$$

$$P_{\max} = \frac{4{,}7 n_{\text{в}} d S_0}{1{,}2 - 0{,}2 \dfrac{H}{S_0}} \sigma_{\text{ср}} \left(1 + 0{,}1 \frac{H}{n_{\text{в}} S_0}\right) \text{ при } H < S_0,$$

где H – высота скоса; $n_{\text{в}}$ – коэффициент, определяемый в зависимости от относительной величины скоса режущей кромки H/S_0 и относительной глубины внедрения пуансона h_m/S_0 (рис. 7.23).

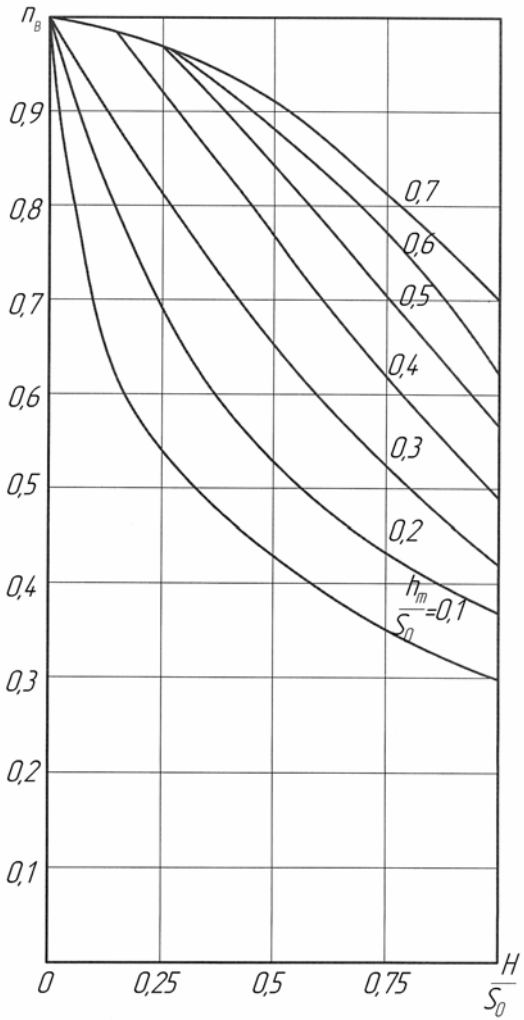


Рис. 7.23. Зависимость коэффициента $n_в$ от механических свойств материала h_m/S_0 и относительной высоты скоса пуансона H/S_0

Усилие, затрачиваемое на удаление детали или отхода из матрицы с рабочим пояском, определяется в зависимости от максимального технологического усилия:

$$P_{пр} = (0{,}05 - 0{,}10)P_{max}, \quad P_{вт} = (0{,}07 - 0{,}14)P_{max},$$

где $P_{пр}$ – усилие проталкивания; $P_{вт}$ – усилие выталкивания.

Более высокие значения коэффициентов назначаются для

меньших толщин, зазоров, при работе без смазки.

Усилие снятия полосы, ленты с пуансона после вырубки (пробивки) определяется в зависимости от максимального технологического усилия:

$$P_{сн} = K_{сн} \cdot P_{max},$$

где $K_{сн}$ – коэффициент, учитывающий, какую долю от максимального усилия вырубки (пробивки) составляет усилие снятия. Значение $K_{сн}$ устанавливается в зависимости от толщины заготовки и типа штампа (табл. 7.9).

Таблица 7.9

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 заготовки с большей толщиной и при увеличении числа позиций в штампе.

Полная работа формоизменения определяется по следующим формулам:

$A = \lambda \dfrac{P_{max} S_0}{1000}$ – при вырубке (пробивке) деталей различной конфигурации инструментом с плоскими режущими кромками;

$A = \dfrac{1{,}5\pi d S_0 \sigma_{ср}(S_0 K + 0{,}1H)}{1000}$ – при вырубке (пробивке) круглых деталей инструментом со скошенными режущими кромками.

Коэффициент λ определяется в соответствии с приведенными выше рекомендациями. Значения λ приведены в табл. 7.10.

Таблица 7.10

Значения коэффициента λ для определения работы формоизменения при вырубке, пробивке инструментом с плоскими режущими кромками

Материал	Толщина заготовки S_0, мм			
	До 1	1-2	2-4	Свыше 4

Сталь мягкая, $\sigma_{ср}$= 245-343 МПа (25-35 кгс/мм^2)	0,70-0,65	0,65-0,60	0,60-0,50	0,45-0,35
Сталь средней твердости, $\sigma_{ср}$= 343-490 МПа (35-50 кгс/мм^2)	0,60-0,55	0,55-0,50	0,50-0,42	0,40-0,30
Сталь твердая, $\sigma_{ср}$= 490-686 МПа (50-70 кгс/мм^2)	0,45-0,40	0,40-0,35	0,35-0,30	0,30-0,15
Алюминий, медь (отожженные)	0,75-0,70	0,70-0,65	0,65-0,55	0,50-0,40

7.2.4. Расчет рабочего инструмента на прочность

Расчет пуансонов на прочность по допускаемым нагрузкам на сжатие и продольный изгиб выполняется по следующим формулам:

$\sigma_{сж} = \dfrac{P_{max}}{F_{оп}} \le [\sigma_{сж}]$ – 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. 7.13, *а–в*).

$$P_{max} \le \frac{1}{K_у} P_{кр},$$

где $\sigma_{сж}$ – напряжение сжатия в опасном сечении рабочей части пуансона; $\sigma_{пр}$ – приведенное напряжение; $\sigma_{и}$ – напряжение изгиба в месте крепления сечения; $[\sigma_{сж}]$ – допускаемое напряжение на сжатие материала пуансона с учетом вида термической обработки (табл. 7.11); $P_{кр}$ – критическая нагрузка; $K_у$ – коэффициент запаса устойчивости (для закаленной стали применяется $K_у$ = 2–3).

Величина максимального технологического усилия P_{max} рассчитывается в соответствии с приведенными выше рекомендациями.

Напряжения от изгиба определяются по формуле

$$\sigma_{и} = \frac{M_{и}}{W},$$

где $M_{и} = P \cdot l$ – изгибающий момент; W – момент сопротивления сечения.

Таблица 7.11

Допускаемые напряжения для материалов, применяемых при изготовлении рабочего инструмента

Марка стали	$\sigma_в$, МПа (кгс/мм^2)	Допускаемые напряжения, МПа (кгс/мм^2)			Твердость *HRC*
		на растяжение[$\sigma_р$]	на сжатие [$\sigma_{сж}$]	на изгиб [$\sigma_и$]	
Сталь 65Г	1470 (150)	-	-	490-784 (50-80)	38-45
Сталь У7, У7А	-	-	539-784 (55-80)	3528-490 (36-50)	52-57
Сталь У8, У8А У10, У10А Х12М ШХ15	2646-2695 (270-275) 2842-2940 (290-300) 2646-2744 (270-280) 2646-2744 (270-280)	245 (25)	980-1568 (100-160)	294-490 (30-50)	58-62
Х12ФI 9ХС ХВГ	2646-2744 (270-280) 2401-2450 (245-250) 2450-2499 (250-255)	-	-	-	59-61 56-57 60-63
7ХГ2ВФМ	2352-2548 (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.

В общем случае критическое значение нагрузки может быть выражено формулой

$$P_{кр} = \eta \frac{EJ}{l^2},$$

где J – осевой момент инерции; l – длина незакрепленной части пуансона (см. рис. 7.13); E – модуль нормальной упругости. Для инструментальной стали принимается $E = 20{,}6 \cdot 10^4 - 21{,}6 \cdot 10^4$ МПа ($2{,}1 \cdot 10^4 - 2{,}2 \cdot 10^4$ 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 (сосредо-

точенные, 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. 7.13, *в*) принимается $\eta = 2{,}467$.

Для того же случая с применением промежуточной опоры направляющей втулки или съемника (см. рис. 7.14, *б*) и нагружения в торец продольной силой значение коэффициента η определяется 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	1,0
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:

1) при отсутствии смещения оси пуансона относительно оси матрицы

$\frac{d_п}{S_0} \geq 5{,}2\frac{\sigma_{ср}}{[\sigma_{сж}]}$ – для цилиндрических пуансонов;

$\frac{a_п}{S_0} \geq 5{,}2\frac{\sigma_{ср}}{[\sigma_{сж}]}$ – для пуансонов с квадратным поперечным сечением;

$\frac{a_п}{S_0}\frac{1}{\left(1+\frac{a_п}{b_п}\right)} \geq 2{,}6\frac{\sigma_{ср}}{[\sigma_{сж}]}$ – для пуансонов с поперечным сечением в виде шестигранника;

2) при смещении оси пуансона относительно оси матрицы на величину $l = z$

$\frac{d_п}{S_0} \geq 5{,}2\left(1+8\frac{z}{d_п}\right)\frac{\sigma_{ср}}{[\sigma_{сж}]}$ – для цилиндрических пуансонов;

$\frac{a_п}{S_0} \geq 5{,}2\left(1+6\frac{z}{a_п}\right)\frac{\sigma_{ср}}{[\sigma_{сж}]}$ – для пуансонов с квадратным поперечным сечением;

$$\frac{a_п}{S_0\left(1+\frac{a_п}{b_п}\right)} \geq 2{,}6\left(1+6\frac{z}{a_п}\right)\frac{\sigma_{ср}}{[\sigma_{сж}]}$$ – для пуансонов с прямоугольным поперечным сечением;

$$\frac{a_п}{S_0} \geq 1{,}39\left(1+10{,}35\frac{z}{a_п}\right)\frac{\sigma_{ср}}{[\sigma_{сж}]}$$ – для пуансонов с шестигранным поперечным сечением, где $d_п$ – диаметр рабочей части цилиндрического пуансона; $a_п$ – длина стороны квадрата, шестигранника и наименьшей стороны квадрата, шестигранника и наименьшей стороны прямоугольника; $b_п$ – длина большей стороны прямоугольника.

Допускаемая из условия прочности на продольный изгиб длина незакрепленной части пуансонов будет равна:

$$l \leq \sqrt{\frac{\pi^2 EJ}{4K_у P_{max}}}$$ – для штампов без направляющей втулки или плиты;

$$l \leq \sqrt{\frac{\eta EJ}{K_у P_{max}}}$$ – для штампов с направляющей втулкой, плитой.

Допускаемое значение относительной длины незакрепленной части пуансона при $K_у = 3$ может быть определено из следующих формул:

$$\frac{l}{d_п} \leq 0{,}10\sqrt{\frac{d_п}{S_0}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{ср}}}$$ – для цилиндрического пуансона без промежуточной опоры;

$$\frac{l}{d_п} \leq 0{,}11\sqrt{\eta}\sqrt{\frac{d_п}{S_0}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{ср}}}$$ – для цилиндрического пуансона с промежуточной опорой;

$$\frac{l}{d_п} \leq 0{,}13\sqrt{\frac{a_п}{S_0}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{ср}}}$$ – для пуансона с квадратным сечением без промежуточной опоры;

$$\frac{l}{a_п} \leq 0{,}08\sqrt{\eta}\sqrt{\frac{a_п}{S_0}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{ср}}}$$ – для пуансона с квадратным сечением с промежуточной опорой;

$$\frac{l}{a_п} \le \sqrt{\frac{a_п}{S_0\left(1+\frac{a_п}{b_п}\right)}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{ср}}}$$ – для пуансона с прямоугольным сечением без промежуточной опоры;

$$\frac{l}{a_п} \le 0{,}12\sqrt{\eta}\sqrt{\frac{a_п}{S_0\left(1+\frac{a_п}{b_п}\right)}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{ср}}}$$ – для пуансона с прямоугольным сечением при наличии промежуточной опоры;

$$\frac{l}{a_п} \le 0{,}27\sqrt{\frac{a_п}{S_0}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{ср}}}$$ – для пуансона шестигранного без промежуточной опоры;

$$\frac{l}{a_п} \le 0{,}17\sqrt{\eta}\sqrt{\frac{a_п}{S_0}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{ср}}}$$ – для пуансона шестигранного с промежуточной опорой.

Проверка прочности матриц производится по допускаемым напряжением на изгиб и разрыв в окружном направлении, т.е.

$$\sigma_и \le [\sigma_и],\ \sigma_р \le [\sigma_р],$$

где $\sigma_и$, $\sigma_р$ – действующие напряжения изгиба и растяжения, соответственно; $[\sigma_и]$, $[\sigma_р]$ – допускаемые напряжения на изгиб и разрыв, соответственно.

Напряжения изгиба $\sigma_и$ вычисляются по следующим формулам:

$$\sigma_и = \frac{2{,}5P_{max}}{H_м^{\ 2}}\left(1-\frac{2}{3}\frac{d_м}{d_о}\right)$$ – для круглой матрицы с диаметрами цилиндрического пояска $d_м$ и опорного кольца $d_о$ (рис. 7.24, *а*);

$$\sigma_и = \frac{1{,}5P_{max}}{H_м^{\ 2}}$$ – для прямоугольной матрицы с опорой на плиту с квадратным отверстием $a \times a$ (рис. 7.24, *б*);

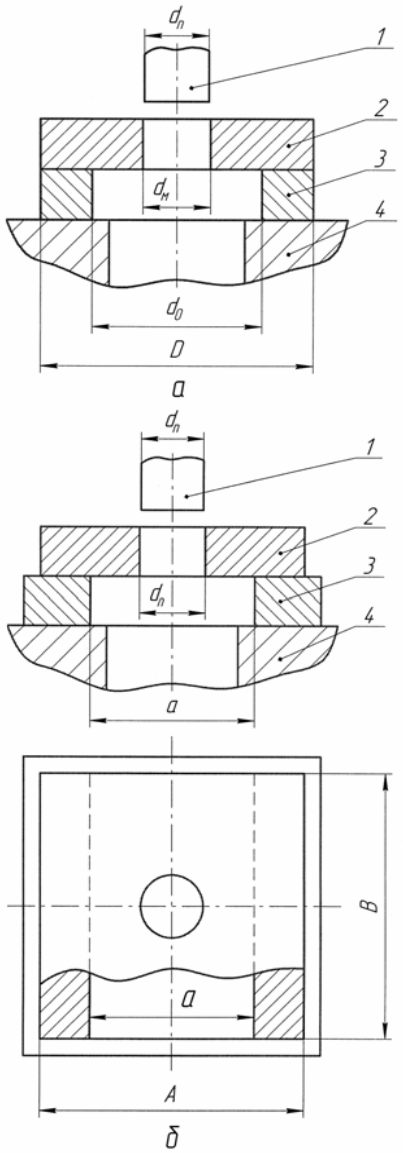


Рис. 7.24. Схемы установки кольцевой (*а*) и прямоугольной (*б*) матриц:

1 – пуансон; *2* – матрица; *3* – кольцо

$$\sigma_и = \frac{3P_{max}}{H_м^{\ 2}}\left(\frac{b/a}{1+b^2/a^2}\right)$$ – для прямоугольной матрицы с опорой на плиту с прямоугольным отверстием размерами $a \times b$ (рис. 7.24, *б*), где $H_м$ – толщина матрицы.

Допускаемые значения толщин матрицы рассчитываются из условия прочности на изгиб:

$$H_м \geq \sqrt{\frac{2{,}5P_{max}}{[\sigma_и]}\left(1-\frac{2d_м}{3d_о}\right)}$$ – для круглой матрицы;

$H_м \geq \sqrt{1{,}5P_{max}/[\sigma_и]}$ – для прямоугольной матрицы с опорой на плиту с квадратным отверстием;

$$H_м \geq \sqrt{\frac{3P_{max}}{[\sigma_и]}\left(\frac{b/a}{1+b^2/a^2}\right)}$$ – для прямоугольной матрицы с опорой на плиту с прямоугольным отверстием.

Растягивающие напряжения рассчитываются по формуле

$$\sigma_р = 0{,}4\frac{P_{max}}{F_м},$$

где $F_м$ – площадь опасного (минимального или проходящего через концентраторы напряжений) сечения матрицы.

$F_м = H_м(D - d_м)$ – для кольцевых матриц с круглым рабочим отверстием;

$F_м = 1{,}4H_м(A - a_м)$ – для квадратных матриц с квадратным рабочим отверстием;

$F_м = H_м[\sqrt{A^2 + B^2} - \sqrt{a_м{}^2 + b_м{}^2}]$ – для прямоугольных матриц с прямоугольным рабочим отверстием, где D – наружный диаметр матрицы; A – ее длина; B – ширина.

В матрицах для вырубки, пробивки деталей и отверстий с профилем в виде многоугольника опасное сечение проходит через противоположные углы по диагонали.

7.3. Раскрой листового материала

В патронно-гильзовом производстве выпуск продукции исчисляется сотнями тысяч и десятками миллионов изделий в год, поэтому особое внимание следует обращать на экономию материала. В штамповочном производстве она во многом определяется раскроем (целесообразным порядком расположения деталей на исходной заготовке), при котором отход будет наименьшим, а выход деталей наибольшим.

Показателем выбранного раскроя, характеризующим его экономичность и рациональность, является коэффициент использования материала η, представляющий отношение полезной площади (площадь детали) F_0 к площади заготовки $F_{заг}$, идущей на изготовление этой детали при вырубке: $\eta = \frac{F_0}{F_{заг}} 100\%$.

Наиболее часто встречающиеся в патронном производстве виды раскроя приведены в табл. 7.12.

Число рядов при вырубке по ширине ленты или полосы в зависимости от диаметра кружка рекомендуется выбирать по табл. 7.13.

На коэффициент использования материала влияют форма заготовки и величины технологических перемычек между вырубаемыми контурами и краем полосы. При штамповке величина перемычки должна обеспечивать достаточную жесткость и прочность ленты так, чтобы последняя не разорвалась при подаче, не втянулась в матрицу, не вызвала образования заусенцев.

Основной формой заготовки для элементов патрона является кружок, однако в последнее время все большее применение находят более экономичные формы: квадрат, шестигранник, прямоугольник, позволяющие повысить коэффициент использования материала.

Таблица 7.12

Виды раскроя

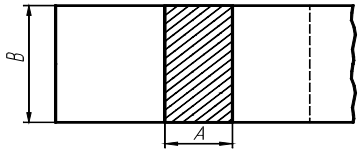
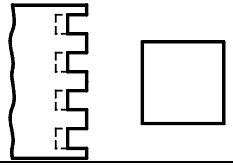
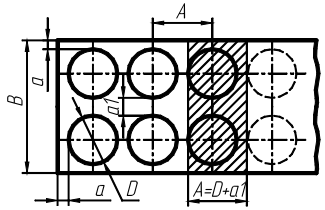
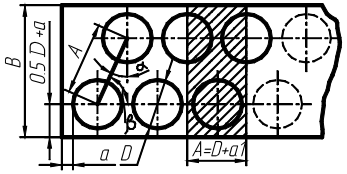
Вид	Схема	Коэффициент использования материала η
Безотходный		$\eta \approx 100\%$
С боковыми перемычками по незамкнутому контуру		При увеличении числа n рядов врубаемой детали $\eta \to 100\%$
С перемычками по замкнутому контуру	**Параллельное расположение деталей**  **Шахматное расположение деталей**  B – ширина полосы, мм; A – продольный шаг подачи, мм; a – величина перемычки между краем детали и кромкой полосы, мм; a_1 – величина перемычки между вырубаемыми деталями, мм; D – диаметр вырубаемого кружка, мм; n – число рядов вырубаемых деталей.	$\eta = \dfrac{n \cdot 0{,}785 D^2 \cdot 100\%}{(D + a_1)[nD + 2a + (n-1)a_1]}$ $\eta = \dfrac{n \cdot 0{,}785 D^2 \cdot 100\%}{(D + a_1)[(D + 2a) + (n-1)(D + a_1)\cos\alpha]}$

Таблица 7.13

Число рядов по ширине полосы или ленты при раскрое

Диаметр кружка, мм	Число рядов по ширине полосы или ленты
< 10	≥ 10
10-20	7-9
20-30	5-7
30-75	3-4
75-100	2-3
> 100	2-1

Основные расчетные формулы для определения ширины полосы B при однорядной вырубке следующие:

• с боковым прижимом и с односторонним минусовым допуском Δ' на ширину полосы

$$B = D + 2(a + \Delta');$$

• без бокового прижима и с односторонним минусовым допуском на ширину полосы

$$B = D + 2(a + \Delta') + z,$$

где при B до 100 мм – z = 0,5…1,0 мм; при B > 100 мм – z = 1,0…1,5 мм;

• без бокового прижима для случая двустороннего допуска на ширину полосы

$$B = D + 2(a + \Delta') + z.$$

Эти формулы могут быть легко преобразованы и для случая многорядной вырубки.

Анализ величин перемычек, принимаемых при раскрое материала в патронно-гильзовом производстве, а также в производстве общего машиностроения, показал, что величины a и a_1 приблизительно одинаковы, поэтому при раскрое материала можно пользоваться данными табл. 7.14.

7.4. Контроль и обеспечение качества штампуемых заготовок и деталей

Заготовки и полуфабрикаты после разделительных операций подвергаются контролю по форме и состоянию поверхности (наружному виду) и по размерам.

Контролируются по наружному виду:

- форма отштампованной заготовки (отсутствие косого среза у кружка, полосы, неполной формы кружка и т.д.);
- состояние поверхности (отсутствие царапин, надрывов, расслоений, раковин, отпечатков от валков и т.д.).

Контролируются по размерам:

- толщина (вырубаемого кружка, шестигранника, прямоугольника, квадрата);
- диаметр (кружка), длина, ширина полосы, сторона многоугольника (квадрата, шестигранника);
- эллипсность (кружка);
- серповидность (полос и лент);
- наружный диаметр колпака (для вырубки-свертки);
- высота и косина колпака (для вырубки-свертки);
- разностенность колпака (для вырубки-свертки);
- диаметр затравочного отверстия.

Контроль вырубаемых кружков по размерам осуществляется при помощи следующего мерительного инструмента:

- скобы на толщину кружка;
- скобы на диаметр кружка;
- матрицы для проверки эллипсности кружка.

Контроль свернутого колпака по размерам осуществляется при помощи следующего мерительного инструмента:

- матрицы на кривизну колпака;
- индикаторного прибора на разностенность колпака;
- прибора на толщину дна колпака;
- угольника на длину и косину колпака;
- кольца для контроля наружного диаметра колпака.

Точность изготовления заготовок, получаемых отрезкой, вырубкой и отрезкой в штампах или на ножницах, зависит от точности изготовления режущих кромок, инструмента, их состояния, толщины материала, наличия прижима, состояния оборудования.

Брак при вырубке является результатом нарушения правил

эксплуатации инструмента, оборудования или нарушения технологического процесса.

Наиболее характерные виды брака при вырубке и вырубке-свертке приведены в табл. 7.15.

Таблица 7.15

Виды брака при вырубке и вырубке-свертке и причины его появления

Вид	Причина
1	2
Заусенец по кромке	**Вырубка** Режущие кромки пуансона или матрицы затуплены. Рабочие кромки матрицы имеют обратный конус с углом α. Зазор $2z$ между пуансоном и матрицей больше или меньше оптимального для данной марки и толщины штампуемого материала. Пуансон в процессе работы сместился по отношению к режущим кромкам матрицы. Поверхность стола пресса или подштамповой плиты не параллельна нижней поверхности ползуна пресса. Хвостовик штампа закреплен неправильно, т.е. центр давления штампа и ось ползуна не совпадают
Изогнутый кружок	Большой зазор между пуансоном и матрицей. Выпуклость на торце пуансона. Изогнутость полосы металла. Мягкий материал
Неправильная форма кружка, косой срез у кружка	Заправка полосы в многорядный штамп с шахматным расположением вырубаемых деталей без использования предварительного упора, и подача вновь заправляемой полосы непосредственно за выходящей. Косообразные концы у полос. Некратная длина полосы шагу подачи. Недоведение полосы до упора. Износ направляющих полос у линеек в штампе. Использование узкой или широкой полосы
	Использование полосы с серповидностью. Неправильная установка штампа. Затягивание перемычки при проталкивании вырубленной детали через матрицу. Изгиб полосы в процессе вырубки. Несцентрированные пуансон и матрица
Отпечатки от валков подачи	Не отрегулирован нажим подающих валков
Надрывы по кромке кружка	Использование окисленного или загрязненного материала: полос, лент

Продолжение табл. 7.15

1	2

Трещины по кромке, расслоение, пузыри	Использование металла с дефектами
Колпачки неправильной формы с большой косиной или с вырванным краем	**Вырубка-свертка** Недоведение полосы до временного упора. Подача вновь заправляемой полосы непосредственно за выходящей без применения временного упора. Некратность длины полосы числу подачи или косой срез конца полосы. Неравномерная подача полосы. Застревание просечки в вырубной матрице и как следствие этого неправильная установка кружка относительно сверточного пуансона. Применение узких и серповидных полос, вызывающих просечки. Колодка с матрицами по отношению к плоскости полосы установлена под углом
Спрессованный колпачок	***Поломка сверточного пуансона вследствие:*** – появления трещины при термической обработке на сверточном пуансоне в зоне перехода от рабочей части к направляющей; – односторонней нагрузки при свертке кружка неполной формы
Колпачок с вытянутым краем	Выкрашивание края вырубного пуансона или матрицы
Колпачки с прорванным дном, надрывами в местах перехода от дна к стенке или с сильно вытянутой донной частью, имеющей значительную сферу и кольцевое утонение в нижней части колпачка, местным или кольцевым обрывом	Неправильная форма части матрицы или сверточного пуансона (радиус и угол сверточной части матрицы малы). Сильный прижим вырубным пуансоном кружка в момент начала работы сверточного пуансона. Преждевременная работа сверточного пуансона до окончания процесса вырубки. Неудовлетворительное качество металла: – повышенная твердость *HRB*: для латуни > 50, биметалла > 60, стали > 60; – наличие крупного зерна: для латуни > 0,12 мм, для биметалла и стали зерно феррита крупнее 5 баллов; – наличие цементитной сетки и структурно-свободного цементита при вырубке и свертке из стали и биметалла; – наличие пластинчатого перлита при вырубке и свертке из стали и биметалла; – наличие полосчатости более 2 баллов при вырубке и свертке из стали и биметалла

Окончание табл. 7.15

1	2
Кольцевой надрыв на боковой поверхности колпачка, отрыв дна колпачка, отрыв кромки	Применение полос с расслоением металла
Плены на наружной и внутренней поверхности	Применение полос с пленами
Царапины и задиры на боковой поверхности	Дефекты на рабочей поверхности матрицы: – налипание металла вследствие наличия мягких участков или трещин; – плохая полировка; – нарушение хромового покрытия. Загрязненная смазка. Загрязненная поверхность полосы металла. Отделение «козырьков» и засорение матрицы
Низкий колпак с риской	Применение матрицы с продольной трещиной
Неправильная форма торцевой поверхности колпака	Неправильный выбор радиусов матрицы
Разностенность и косина	Несовпадение оси матрицы с осями вырубного и сверточного пуансона за счет зазоров. Несовпадение осей матрицы и сверточного пуансона вследствие неконцентричности отверстия под сверточный пуансон в вырубном пуансоне. Матрица по отношению к пуансону установлена с перекосом. Полоса материала по длине или ширине имеет разную толщину. Матрица или сверточный пуансон эллипсоидальны. Косой цилиндрический поясок матрицы
Неточная высота колпака	Неправильный зазор между сверточным пуансоном и матрицей. Неправильные радиусы на сверточном пуансоне и матрице

Точность обрезки зависит от выбранного способа обрезки, точности станка, диаметра и длины обрезаемого изделия и неизменности наладки станка в процессе его работы. В табл. 7.16 приведены данные по точности обрезки на существующем парке обо-

рудования патронных заводов.

Таблица 7.16

Точность обрезки заготовок по длине, мм

Способ обрезки	Диаметр, мм	Длина, мм			
		10-30	30-50	50-100	100
Обрезка на оправке при принудительном вращении детали и дискового ножа	5-10 10-15 15-25	± 0,20 ± 0,30 ± 0,30	± 0,30 ± 0,40 ± 0,40	± 0,40 ± 0,50 ± 0,50	± 0,50 ± 0,70 ± 0,70
Обрезка на вращающихся роликах при принудительном вращении дискового ножа	5-10 10-15 15-25	± 0,12 ± 0,15 ± 0,15	± 0,20 ± 0,25 ± 0,30	± 0,30 ± 0,35 ± 0,40	± 0,50 ± 0,70 ± 0,70
Обрезка дисковым резцом деталей, зажатых в цангу	5-10 10-15 15-25	± 0,10 ± 0,15 ± 0,20	± 0,20 ± 0,25 ± 0,30	± 0,20 ± 0,30 ± 0,35	± 0,30 ± 0,40 ± 0,50

Нарушение правил эксплуатации в процессе производства приводит к браку, основные виды и причины которого приведены в табл. 7.17.

Таблица 7.17

Виды и причины брака при обрезке полых металлических деталей (полуфабрикатов)

Вид	Причина
1	2
Недорезы	Плохое обезжиривание полуфабриката, поступающего на обрезку. Срабатывание зубцов у наконечника оправки. Слабый прижим обрезаемой детали к наконечнику заталкивателем. Износ или неправильные размеры обрезного кольца. Тупой дисковый нож. Изношенные центры, поддерживающие оправку с дисковым ножом. Недостаточное радиальное перемещение дискового ножа вследствие неправильной наладки станка. Большое радиальное перемещение дискового ножа, вызывающее остановку обрезаемого изделия
Заусенцы у обреза, рваные края	Тупой дисковый нож или обрезное кольцо, выкрашивание кромки у ножа или кольца.

Окончание табл. 7.17

1	2

Короткие и длинные изделия	Неправильная регулировка дискового ножа в осевом направлении, неправильное положение обрезного кольца, неправильная посадка обрезаемой заготовки на оправку
Дуговые надрезы на изделиях, обрезаемых на опорных роликах	Продольное качание дискового ножа из-за плохого крепления оправки ножа в центрах
Царапины на донышке и на поверхности головки у деталей, обрезаемых на оправке	Остановка упорного стержня

Точность диаметра при пробивке затравочных отверстий зависит от точности рабочего инструмента и лежит в пределах 0,1–0,12 мм.

Нарушение правил эксплуатации в процессе производства приводит к браку, основные виды и причины которого приведены в табл. 7.18.

Таблица 7.18

Виды и причины брака при пробивке затравочных отверстий

Вид	Причина
Наличие внутри гильзы неотделившейся крупки	Тупые пуансоны (иголки) или неправильный угол наклона торца иголки. Узкая перемычка на игольной стойке
Царапины на капсюльном гнезде	Отгиб пуансонов (иголок) в стороны вследствие неправильной заточки, изношенных отверстий в игольной каморе и выкрашивания каморы. Несовпадение отверстий в большой и малой игольных каморах. Широкая перемычка у игольной стойки (ширина больше, чем расстояние между иглами) или изгиб стойки
Непробитое отверстие	Сломанный пуансон (иголка)

Гильза с тремя отверстиями и больше	Нарушение работы выталкивателя (т.е. выталкиватель не удаляет гильз из круга станка)
Зарубленный край капсюльного гнезда	Неправильная подача круга станка
Отпечатки на перегородке и шляпке	Неправильная установка стойки или попадание постороннего предмета между изделием и большой игольной каморой

Контрольные вопросы

9. Какие применяются способы отрезки на ножницах и в штампах?
10. Какие существуют стадии процесса вырубки и пробивки?
11. Какие силы и моменты действуют в зоне очага пластической деформации при вырубке и пробивке?
12. Какие технологические факторы и как влияют на усилия отрезки, вырубки и пробивки?
13. В чем заключаются особенности процесса пробивки затравочных отверстий?
14. Какое напряженно-деформированное состояние характерно для процессов вырубки и пробивки в зоне очага пластической деформации?
15. Какие технологические факторы и каким образом влияют на качество штампуемых заготовок и деталей?
16. Какие применяют способы обрезки полых тонкостенных заготовок?
17. Какие технологические параметры характеризуют процессы разделительной штамповки?
18. Как рассчитываются технологические усилия при отрезке, вырубке и пробивке?
19. Что понимается под оптимальным технологическим зазором и в зависимости от чего он назначается?
20. Как рассчитываются исполнительные размеры рабочего инструмента при вырубке и пробивке?
21. Как рассчитывается рабочий инструмент на прочность?
22. Какие виды раскроя листового материала применяют в патронном производстве?
23. Какие виды брака наиболее часто встречаются при штамповке заготовок и деталей способами вырубки и пробивки?

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: ГЕРС, 1997. 336 с.

2. *Аверкиев Ю.А.*, Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки: Учеб-

ник. 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.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие…….....3
Основные условные обозначения и сокращения …….....4
1. ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЮ ПАТРОННОГО ПРОИЗВОДСТВА..... 7
1.1. Технология производства – прикладная техническая наука……..... 7
1.2. Характеристика патронов как объектов технологии…….....9
1.3. Краткие исторические сведения о развитии патронного производства…..12
1.4. Основные понятия о производственном и технологическом процессах.....19
1.5. Свойства технологических процессов как объектов проектирования и эксплуатации……..... 22
1.6. Особенности современного патронного производства…….....49
Контрольные вопросы…….....….. 54
Библиографический список…….....… 54
2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПАТРОНОВ.....… 55
2.1. Показатели качества……..... 55
2.2. Методы определения и оценки уровня показателей качества….....59
2.3. Выбор критериев нарушения работоспособности …….....…66
2.3.1. Термины и определения основных понятий……..... 66
2.3.2. Критерии отказов……..... 67
2.3.3. Конструктивно-технологические параметры, влияющие на качество и работоспособность металлических элементов патронов……..... 81
2.3.4 Обобщенный алгоритм технологического обеспечения качества и надежности патронов……..... 92
Контрольные вопросы……..... 101
Библиографический список……..... 101
3. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАТРОНОВ..... 102
3.1. Постулируемые положения…….....102
3.2. Оценка накопленной эффективной степени деформации……..... 105
3.3. Модель кривой течения (упрочнения) $\sigma_i - \varepsilon_i$ материла…….....111
3.4. Модель коэффициента использования ресурса пластичности (поврежденности) материала……..... 118
3.5. Модели предельных состояний металла детали при пластической деформации……..... 128
3.6. Модели формирования механических свойств материалов металлических элементов патронов…….....131
Контрольные вопросы……..... 146
Библиографический список……..... 147
4. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАТРОНОВ…….....148
4.1. Основные понятия и определения…….....148
4.2. Методы оценки и показатели технологичности……..... 154
4.3. Классификация металлических элементов патронов по конструктивно-технологическим признакам……..... 166
4.3.1. Постановка задачи…….....166

4.3.2. Технологическое подобие…….....167
4.3.3. Технологический классификатор……..... 171
4.4. Методические основы обеспечения технологичности конструкции патронов на стадии проектирования…….....183
4.4.1. Цели и задачи обеспечения технологичности конструкции изделия…….....183
4.4.2. Обеспечение технологичности конструкции элементов патрона...184
Контрольные вопросы……..... 193
Библиографический список……..... 193
5. КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ….....194
5.1. Классификация процессов штамповки……..... 194
5.2. Характеристика и область применения процессов листовой разделительной штамповки……..... 206
5.3. Характеристика и область применения процессов листовой формоизменяющей штамповки……..... 209
5.4. Характеристика и область применения процессов объемной штамповки……..... 212
5.5. Характеристика и область применения комбинированных процессов штамповки…….....215
Контрольные вопросы…….....222
Библиографический список……..... 222
6. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ПАТРОНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ..... 223
6.1. Требования, предъявляемые к материалам……..... 223
6.2. Виды материалов и сортамент…….....224
6.3. Цветные металлы и сплавы…….....226
6.3.1. Латуни…….....226
6.3.2. Свинец……..... 235
6.4. Черные металлы…….....237
6.5. Биметаллы……..... 250
6.6. Контроль качества исходного материала и штампованных полуфабрикатов…….....……... 255
6.6.1. Методы контроля……..... 255
6.6.2. Контроль качества металла по химическому составу, макро- и микроструктуре…….....259
6.6.3. Контроль качества исходного материла и полуфабрикатов на наличие дефектов и по размерам…….....263
6.6.4. Механические испытания……..... 269
6.6.5. Технологические и натурные испытания материалов……..... 279
Контрольные вопросы…….....289
Библиографический список……..... 290
7. ПРОЦЕССЫ ЛИСТОВОЙ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ ШТАМПОВКИ..... 291
7.1. Технологические особенности процессов разделительной штамповки……..... 291
7.1.1. Отрезка……..... 291
7.1.2. Вырубка и пробивка…….....299
7.1.3. Обрезка……..... 314
7.2. Расчет технологических параметров……..... 318

7.2.1. Технологические параметры……..... 318
7.2.2. Расчет исполнительных размеров рабочего инструмента……....327
7.2.3. Расчет технологических усилий и работы формоизменения….....330
7.2.4. Расчет рабочего инструмента на прочность……..... 333
7.3. Раскрой листового материала…….....339
7.4. Контроль и обеспечение качества штампуемых заготовок и деталей..... 343
Контрольные вопросы…….....349
Библиографический список……..... 349

Агеев Николай Павлович, Данилин Геннадий Александрович,
Огородников Владимир Петрович

Технология производства патронов стрелкового оружия
Часть 1
Технологические основы проектирования патронов

Редактор *Г.М. Звягина*
Подписано в печать 28.12.2005. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 22. Уч.-изд. л. 22,5. Тираж 500 экз. Заказ №
Балтийский государственный технический университет
190005, С.-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1