

The background of the cover features an abstract geometric design. It consists of several overlapping shapes: a large blue shape on the left and right, a white shape at the top center, and a prominent red shape that curves from the top center down towards the right side. The overall composition is clean and modern.

С. А. ВАЛИЕВ

**КОМБИНИРОВАННАЯ
ГЛУБОКАЯ
ВЫТЯЖКА
ЛИСТОВЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

С. А. ВАЛИЕВ

КОМБИНИРОВАННАЯ ГЛУБОКАЯ ВЫТЯЖКА ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ



Москва
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1973

Валиев С. А. Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов. М., «Машиностроение», 1973, 176 с.

В книге изложены основы комбинированной глубокой вытяжки листовых материалов.

Предложена классификация процессов глубокой вытяжки. Рассмотрена методика расчета оптимальных параметров технологии и инструмента для вытяжки цилиндрических и коробчатых деталей, а также параметров рациональных конструкций рабочих частей вытяжных штампов. Показаны новые конструкции вытяжных штампов, обеспечивающие интенсификацию процессов вытяжки.

Книга рассчитана на работников различных отраслей металлообрабатывающей промышленности: технологов, конструкторов, работников научно-исследовательских институтов, связанных с разработкой и внедрением высокопроизводительных и точных технологических процессов.

Табл. 22. Ил. 76. Список лит. 51 назв.

Рецензент д-р техн. наук Е. А. Попов.

В $\frac{3123-084}{038(01)-73}$ 84-73

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|------------|
| Условные обозначения | 3 |
| Введение | 5 |
| Глава I. Общая характеристика процессов глубокой вытяжки | 11 |
| 1. Характеристики деформации | 11 |
| 2. Классификация процессов глубокой вытяжки | 15 |
| 3. Условия, определяющие границы между различными процессами глубокой вытяжки | 17 |
| Глава II. Первый переход комбинированной вытяжки | 28 |
| 1. Особенности деформирования плоской заготовки | 28 |
| 2. Элементы теории комбинированной вытяжки | 32 |
| 3. Условия оптимального расчленения процессов вытяжки на стадии | 39 |
| 4. Экспериментальные исследования первого перехода комбинированной вытяжки на различных матрицах | 51 |
| 5. Первый переход вытяжки коробчатых деталей по новому методу | 59 |
| 6. Особенности комбинированной вытяжки через две матрицы | 63 |
| Глава III. Последующие переходы комбинированной вытяжки | 67 |
| 1. Общие сведения | 67 |
| 2. Вытяжка из полой заготовки с неутоненными стенками | 70 |
| 3. Вытяжка из полой заготовки с утоненными стенками | 72 |
| 4. Вытяжка через две матрицы на последующих переходах | 80 |
| 5. Вытяжка коробчатых деталей на последующих переходах | 83 |
| 6. Реверсивная комбинированная вытяжка | 87 |
| Глава IV. Основы разработки метода комбинированной вытяжки | 89 |
| 1. Качество изделий | 89 |
| 2. О выборе коэффициентов деформации при комбинированной вытяжке | 99 |
| 3. Метод комплексного испытания листовых материалов на способность их к глубокой вытяжке | 103 |
| 4. Штмп-прибор для комплексного испытания листовых материалов | 108 |
| 5. Обобщенная классификация методов и технологических систем глубокой вытяжки | 113 |
| Глава V. Общая методика построения технологического процесса комбинированной вытяжки | 118 |
| 1. О технологичности конструкций полых деталей | 118 |
| 2. Особенности выбора оптимального варианта технологии комбинированной вытяжки | 120 |
| | 175 |

| | |
|---|------------|
| 3. Общая методика расчета технологических параметров комбинированной вытяжки | 123 |
| 4. Технология подготовки заготовок к комбинированной вытяжке | 132 |
| Глава VI. Конструкции штампов для комбинированной вытяжки | 138 |
| 1. Общая методика расчета геометрических параметров рабочих частей штампов | 138 |
| 2. Расчет геометрических параметров рабочих частей штампов для нового метода вытяжки коробчатых деталей | 150 |
| 3. Особенности конструкций штампов для вытяжки на прессах простого действия | 161 |
| 4. Особенности конструкций штампов для вытяжки на прессах двойного действия | 165 |
| 5. Основные требования к прессовому оборудованию | 170 |
| Список литературы | 172 |

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

m_d — суммарный коэффициент вытяжки, $m_d = \frac{d}{D_0}$;

m_s — суммарный коэффициент утонения. $m_s = \frac{s}{s_0}$;

m_{d_i} — коэффициент вытяжки (уменьшения диаметра) на i -м переходе, $m_{d_i} = \frac{d_i}{d_{i-1}}$;

K_{d_i} — степень вытяжки на i -м переходе, $K_{d_i} = \frac{1}{m_{d_i}}$;

m_{s_i} — коэффициент утонения на i -м переходе, $m_{s_i} = \frac{s_i}{s_{i-1}}$;

K_{s_i} — степень утонения на i -м переходе, $K_{s_i} = \frac{1}{m_{s_i}}$;

s_D — относительная толщина плоской заготовки; $s_D = \frac{s_0}{D_0}$;

z_s — относительный зазор, $z_s = \frac{z}{s_0}$;

H_d — относительная глубина (длина) изделия, $H_d = \frac{H}{d}$;

d — диаметр, изделия по срединной поверхности, мм;

D_0 — диаметр плоской заготовки, мм;

s — толщина стенки изделия, мм;

s_0 — толщина исходного материала, мм;

d_i — диаметр полуфабриката (по срединной поверхности) после i -го перехода, мм;

s_i — толщина стенки полуфабриката после i -го перехода $i=1, 2, 3 \dots n$), мм;

z — зазор между пуансоном и матрицей (вытяжной зазор), мм;

H — глубина изделия до обрезки, мм;

H_0 — глубина (длина) готового изделия, мм;

h_{Π} — путь пуансона, мм;

D — текущий диаметр заготовки, мм;

d_M, d_{Π} — диаметры матрицы и пуансона соответственно, мм;

D_K — диаметр входной кромки рабочего конуса матрицы, мм;

R_M, R_{Π} — радиус кромки матрицы и пуансона соответственно, мм;

R_{MC} — радиус кривизны срединной поверхности заготовки на кромке матрицы, $R_{MC} = R_M + \frac{s_0}{2}$;

$R_{\text{пс}}$ — радиус кривизны срединной поверхности заготовки на кромке пуансона, $R_{\text{пс}} = R_{\text{п}} + \frac{s_0}{2}$;

$R_{\text{мс}}$ — относительный радиус кромки матрицы, $R_{\text{мс}} = \frac{R_{\text{м}}}{s_0}$;

$R_{\text{пс}}$ — относительный радиус кромки пуансона, $R_{\text{пс}} = \frac{R_{\text{п}}}{s_0}$;

φ — угол охвата кромки матрицы заготовкой в зоне I очага деформации, град.;

α — угол конической матрицы в рабочем конусе или между хордой и осью в зоне II на радиальной матрице, град.;

$\alpha_{\text{в}}$ — угол матрицы (двухконусной) в верхнем конусе, град.;

$\sigma_{\text{р}}$ — радиально-осевое напряжение в очаге деформации, кгс/мм²;

$\sigma_{\text{т}}$ — тангенциальное напряжение в очаге деформации, кгс/мм²;

$\sigma_{\text{н}}$ — нормальное напряжение на контактной поверхности в очаге деформации, кгс/мм²;

$\sigma_{\text{з}}$ — осевое растягивающее напряжение в стенке при протяжке и комбинированной вытяжке, кгс/мм²;

$\sigma_{\text{с}}$ — предел текучести материала с учетом упрочнения (истинное сопротивление деформированию), кгс/мм²;

$\tau_{\text{с}}$ — напряжение сдвига, кгс/мм²;

$\psi_{\text{р}}$ — равномерное относительное поперечное сужение образца при растяжении;

$\psi_{\text{н}}$ — степень деформации при вытяжке (без утонения);

$\psi_{\text{п}}$ — степень деформации при протяжке;

$\psi_{\text{к}}$ — степень деформации при комбинированной вытяжке;

$\mu_{\text{м}}$, $\mu_{\text{п}}$ — коэффициенты трения на контактных поверхностях матрицы и пуансона соответственно;

Q — усилие прижима заготовки при вытяжке, кгс;

P — усилие вытяжки, кгс.

ВВЕДЕНИЕ

В листовой штамповке одним из наиболее распространенных процессов является вытяжка полых изделий. Изделия, получаемые глубокой вытяжкой, в зависимости от их геометрии можно разделить на два основных вида:

а) осесимметричные (цилиндрические, конические, ступенчатые и т. п.);

б) неосесимметричные [овальные, прямоугольные (в плане) и т. п.].

В настоящей работе рассмотрены вопросы технологии изготовления вытяжкой изделий наиболее часто встречающихся форм: цилиндрической и коробчатой. Такие изделия широко применяются в радиотехнической, электронной, электротехнической, приборостроительной и в других отраслях промышленности, а также в производстве товаров бытового назначения.

Подавляющее большинство цилиндрических полых изделий в настоящее время изготавливают с использованием различных процессов глубокой вытяжки:

а) вытяжки без утонения;

б) вытяжки с утонением (протяжки);

в) комбинированной вытяжки.

Несмотря на то, что технология глубокой вытяжки используется в производстве уже давно, терминология, применяемая для описания процессов вытяжки, еще несовершенна.

В книге вытяжку без утонения назовем «вытяжкой», а вытяжку с утонением — «протяжкой». Термин «комбинированная вытяжка», как и термин «вытяжка с отрицательным зазором»¹,

¹ Терминами «отрицательный» и «положительный» пользуются в зарубежной литературе по вытяжке для характеристики зазора, подразумевая, однако, не вытяжной зазор

$$z = \frac{d_{\text{м}} - d_{\text{п}}}{2} = s_0 + cs_0, \quad (1)$$

а лишь часть его (прибавку) cs_0 [47].

Использование указанных терминов в отечественной литературе применительно к вытяжному зазору приводит к терминологической путанице [23], так как z — величина всегда положительная, а cs_0 может быть как положи-

был предложен автором в 1960 г. Однако термин «комбинированная вытяжка», отражающий совмещение (комбинацию) классических процессов вытяжки и протяжки в одной матрице, оказался наиболее удачным. Определения процессов глубокой вытяжки также требуют уточнения, так как имеют как общие, так и принципиально различные признаки.

Вытяжка — процесс пластического формоизменения плоской или полый заготовки в полое изделие путем втягивания пуансоном в матрицу с существенным уменьшением ее периметра, но без предусмотренного утонения (рис. 1, а, б).

Протяжка — процесс пластического формоизменения полый заготовки в полое изделие путем втягивания пуансоном в матрицу с существенным принудительным уменьшением толщины стенки, но с незначительным уменьшением ее внутреннего размера (рис. 1, в).

Комбинированная вытяжка — процесс пластического формоизменения плоской или полый заготовки в полое изделие путем втягивания пуансоном в матрицу с одновременным существенным уменьшением ее периметра и принудительным утонением (рис. 1, г—е).

В реальных технологических процессах часто сочетаются операции, основанные на различных процессах формоизменения. Например, предварительные операции выполняются вытяжкой, последующие — протяжкой. Если первая и последующие операции технологии имеют в своей основе один и тот же процесс формоизменения, то можно говорить о методически строгой последовательности переходов одного и того же процесса деформации, т. е. о технологическом методе (способе) вытяжки, протяжки и комбинированной вытяжки.

Анализируя современное состояние технологии изготовления полых изделий, можно отметить, что наибольшее распространение получила вытяжка без утонения. Для коробчатых изделий вытяжка при крупносерийном и массовом производстве является единственным методом изготовления, за исключением холодного выдавливания деталей из алюминия и меди.

К недостаткам вытяжки относятся низкая производительность (большое число операций) при изготовлении глубоких изделий и невысокая точность по наружным размерам и по толщине стенки, в некоторых случаях требуется дополнительная обработка.

тельной (при вытяжке), так и отрицательной (при протяжке и комбинированной вытяжке), например, $+36\% s_0$ и $-24\% s_0$ [47].

С учетом знаков прибавки эмпирическая формула (1) может быть обобщена:

$$z = (1 \pm c) s_0, \quad (1')$$

где знак «плюс» соответствует вытяжке, знак «минус» — операциям с принудительным утонением, c — эмпирический коэффициент.

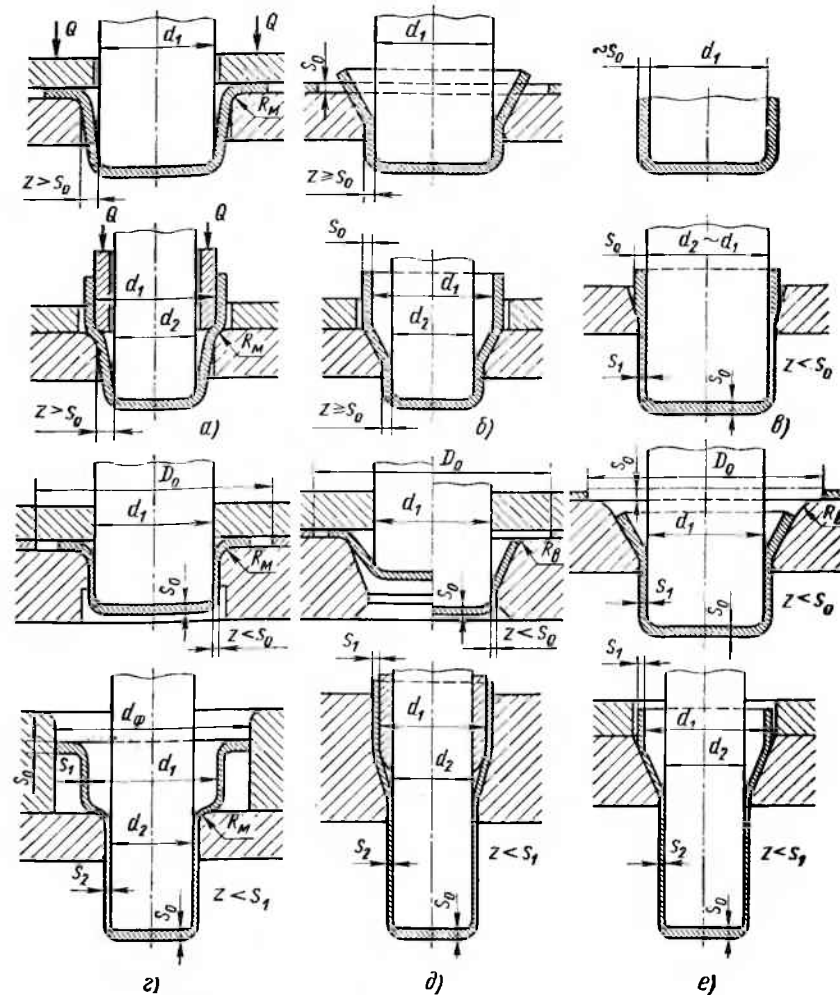


Рис. 1. Схемы первой и второй операций различных методов вытяжки: а, б — вытяжка; в — протяжка; г, д, е — комбинированная вытяжка

Протяжка является основным технологическим методом изготовления тонкостенных трубок и различных гильз [1, 34, 41], но широкого применения в машиностроении не получила. Изделия, изготавливаемые протяжкой, имеют более высокую точность, чем при вытяжке, однако число операций в технологическом процессе, основанном на протяжке, остается значительным.

Сокращение числа операций, увеличение степени деформации и высокую точность изделий обеспечивает метод комбинированной вытяжки. Однако этот метод пока еще ограниченно используется в производстве. Причина заключается в недоста-

точной изученности взаимосвязи явлений, происходящих как при увеличении степени вытяжки (по периметру заготовки), так и при увеличении степени утонения в комбинированном процессе.

Исследованием процессов глубокой вытяжки в нашей стране занимались С. И. Губкин, И. А. Норицын, Е. А. Попов, Г. А. Смирнов-Аляев, В. Т. Мещерин, Л. А. Шофман, Е. И. Исаченков, М. Н. Горбунов, И. П. Ренне, а за рубежом — Г. Закс, Э. Зибель и др. Во многих работах подробно анализировались технологические параметры традиционных процессов вытяжки и протяжки раздельно, причем преобладало мнение о нецелесообразности совмещения этих процессов в одной операции. При вытяжке без утонения обычно рекомендуется стремиться к «чистой» вытяжке, т. е. избегать даже протяжки утолщенного края стенки [32, 47], при вытяжке с утонением заметно стремление к «чистой» протяжке, т. е. к уменьшению внутреннего диаметра заготовки — стакана лишь в пределах десятых долей миллиметра, достаточных для введения пуансона в заготовку [26, 50].

Весьма ограниченные сведения о вытяжке с одновременной значительной деформацией по периметру и принудительным утонением, опубликованные в литературе до 1960 г., противоречивы.

Г. Закс в 1936 г., изучая влияние величины вытяжного зазора в диапазоне $z_1 = (1,35 \div 0,76) s_0$ на первом переходе вытяжки на радиальной матрице со складкодержателем, пришел к выводу, что степень деформации уменьшается с уменьшением зазора. Э. Зибель и Х. Коттхаус в 1954 г., проводя эксперименты при аналогичных условиях также с заготовками малой относительной толщины ($s_D \leq 1,1\%$), пришли к противоположным выводам.

Ошибочный вывод Г. Закса объясняется тем, что он считал лимитирующим фактором возрастающее технологическое усилие, пренебрегая одновременным ростом полезного трения на пуансоне. Эта ошибка была затем повторена в работе [28].

Эксперименты по «свертке» с утонением относительно толстых заготовок ($s_D = 4 \div 20\%$) без складкодержателя на конических и трактриссных матрицах коническим пуансоном, проведенные У. Баудером (1951 г.) [1] и И. П. Обозовым (1959 г.) [30], показали целесообразность использования принудительного утонения на первой операции технологического процесса изготовления тонкостенных сосудов, основанного на многооперационной протяжке. Тем самым были подтверждены данные Качмарека и В. Селлина (1931 г.) об успешном выполнении первой операции (из плоской заготовки с $s_D = 8\%$) вытяжкой с одновременным утонением при изготовлении сосудов с толщиной дна $s_d = 4$ мм и толщиной стенки $s \approx 0,9$ мм.

Комбинированная вытяжка на последующих переходах была применена впервые автором в 1954 г. При изготовлении цилиндрических полых изделий из тонколистовой низкоуглероди-

стой стали с коэффициентами деформации $m_{d_1} = 0,77$ и $m_{s_1} = 0,8$ новая технология обеспечила сокращение числа операций вдвое по сравнению с протяжкой.

На основании положительных результатов практики автором в 1957 г. было проведено экспериментальное и теоретическое исследование комбинированной вытяжки.

В отличие от экспериментов, упомянутых выше, было решено на первом этапе исследовать комбинированную вытяжку без складкодержателя из заготовок с малой относительной толщиной ($s_D \approx 1,14\%$) с использованием конических матриц и цилиндрических пуансонов. Заготовки были из алюминия, латуни, низкоуглеродистой и хромоникелевой сталей. Диапазон изменения зазоров на первом и последующем переходах был принят $z = (1,2 \div 0,5) s_0$, а коэффициенты уменьшения периметра $m_{d_1} \approx 0,55$ и $m_{d_2} \approx 0,76$. Эксперименты на последующем переходе проводились с использованием заготовок — стаканов с неутоненными стенками ($z_1 \approx 1,25 s_0$). Результаты исследований первого этапа были опубликованы в 1960 г.

Минимальные для условий проведенных экспериментов относительные зазоры $\frac{z}{s_0}$, которые еще не вызывали необходимости уменьшения степени вытяжки, приведены в табл. 1. При этих зазорах технологическое усилие возрастало примерно в 1,5 раза, но наблюдалось также значительное увеличение степени деформации ψ и относительной глубины вытяжки H_d .

Таблица 1
Минимальные значения относительного зазора при комбинированной вытяжке на конической матрице с $\alpha = 30^\circ$

| Материал | Относительный зазор $\frac{z}{s_0}$ | | Материал | Относительный зазор $\frac{z}{s_0}$ | |
|-----------------------|-------------------------------------|----------------|---|-------------------------------------|----------------|
| | Первый переход | Второй переход | | Первый переход | Второй переход |
| Алюминий А1 | 0,6 | 0,7 | Сталь низкоуглеродистая 08 кп Сталь типа Х18Н9 | 0,7 | 0,8 0,8 |
| Латунь Л63 | 0,6 | 0,7 | | | |
| | | | | | |

Полученные на первом этапе данные об особенностях отдельных операций, выполненных по комбинированной схеме, определили задачи дальнейших исследований комбинированной вытяжки как единого метода, включающего взаимосвязанную последовательность переходов, выполняемых по этой схеме.

Работы по исследованию и внедрению комбинированной глубокой вытяжки, выполненные за последнее десятилетие, пока-

зывают большую эффективность этого метода, как высокопроизводительного и дающего экономию материала при высоком качестве получаемых изделий. Это предопределяет его дальнейшее широкое использование в промышленности.

Цель настоящей книги — комплексное рассмотрение вопросов технологии и особенностей метода комбинированной глубокой вытяжки на основе экспериментальных и теоретических исследований. В книге обобщены пути интенсификации технологии глубокой вытяжки.

В основу интенсификации технологии глубокой вытяжки автором положен принцип оптимального расчленения процесса формоизменения на характерные стадии в пределах одного перехода и оптимального совмещения деформаций по периметру и толщине на отдельных стадиях первого и последующих переходов. Оптимальные условия для постадийного деформирования заготовок, предполагающего достижение значительного суммарного эффекта за счет умеренных степеней деформации на каждой стадии, обеспечиваются оригинальными конструкциями вытяжных штампов, параметры которых рассчитываются по изложенной в книге методике.

Глава I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССОВ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕФОРМАЦИИ

Основными технологическими характеристиками или параметрами формоизменения в процессах вытяжки приняты: коэффициент вытяжки $m_d < 1$ (или степень вытяжки $K_d = \frac{1}{m_d} > 1$), коэффициент утонения $m_s < 1$ (или степень утонения $K_s = \frac{1}{m_s} > 1$) и относительное сокращение площади поперечного сечения — степень деформации ψ , причем степень деформации является общим показателем, пригодным для оценки любого из рассматриваемых процессов¹.

Из выражения для степени деформации комбинированной вытяжки

$$\psi_k = 1 - m_d m_s \quad (2)$$

можно получить при $m_s = 1$ формулу степени деформации для вытяжки

$$\psi_b = 1 - m_d, \quad (2')$$

а при $m_d \approx 1$ — приближенную формулу степени деформации для протяжки

$$\psi_{\Pi} = 1 - m_s. \quad (2'')$$

Более точно степень деформации при протяжке можно определить по формуле (2).

Однако для широкого использования и сравнения технико-экономической эффективности различных процессов вытяжки более удачным и универсальным критерием суммарной деформации является относительная глубина вытяжки.

¹ Необходимо отметить, что наиболее часто степень деформации (по «русской» и «французской шкалам) используют для оценки операций протяжки [23], так как при изготовлении гильз этот показатель связывают с полученными механическими свойствами стенки [41].

Для простейшего случая цилиндрической вытяжки с малым радиусом закругления у дна относительная глубина в общем виде запишется

$$H_d = \frac{0,25}{m_s} \left(\frac{1}{m_d^2} - 1 \right). \quad (3)$$

Достижимая относительная глубина вытяжки за каждый переход позволяет оценить производительность того или иного метода, т. е. необходимое число операций, так как входящие в формулу (3) суммарные коэффициенты m_d и m_s представляют собой произведения пооперационных коэффициентов деформации:

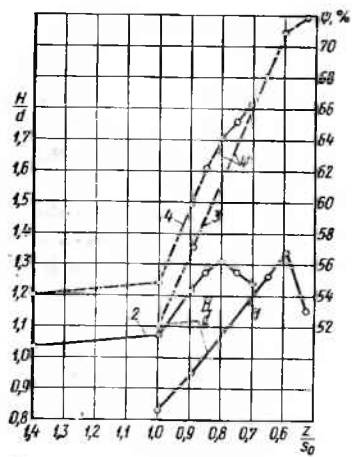
$$m_d = \frac{d}{D_0} = m_{d_1} m_{d_2} \dots m_{d_n}; \quad (4)$$

$$m_s = \frac{s}{s_0} = m_{s_1} m_{s_2} \dots m_{s_n}. \quad (5)$$

Экспериментальные работы по комбинированной вытяжке, выполненные на радиальных и конических матрицах со складкодержателем и на конических матрицах без складкодержателя, показывают, что при предельных значениях m_s и m_d максимально достижимая степень деформации может не соответствовать максимальному значению относительной глубины. Как правило, максимальное значение ψ_k соответствует большей степени утонения (рис. 2). Следовательно, если необходимо получить большую степень деформации, то предпочтительно большее утонение, если же необходимо получить большую относительную глубину, то целесообразно производить большую деформацию периметра.

В литературе встречаются противоречивые толкования коэффициента (и степени) вытяжки. Одни авторы принимают этот показатель как отношение внутренних диаметров заготовки и изделия, другие — как отношение наружных диаметров заготовки и изделия. В связи с тем, что в расчетах размеров заготовок при любом ме-

Рис. 2. Зависимость относительной глубины $\frac{H}{d}$ и степени деформации ψ от величины относительного зазора при вытяжке стали на радиальной и конической матрицах: 1 и 3 — по данным автора (на конической матрице); 2 и 4 — по данным Энбеля и Коттхауса (на радиальной матрице)



тоде вытяжки используется условие постоянства объема, то единственно правильным следует считать соотношение размеров изделия и заготовки по середине толщины. На первом переходе это

$$m_{d_1} = \frac{d_{n_1} + s_1}{D_0} = \frac{d_1}{D_0},$$

на последующих переходах

$$m_{d_i} = \frac{d_{n_i} + s_i}{d_{n_{i-1}} + s_{i-1}} = \frac{d_i}{d_{i-1}},$$

где $d_{n_1}, d_{n_i}, d_{n_{i-1}}$ — диаметры пуансонов и s_1, s_i, s_{i-1} — толщины стенок на соответствующих переходах.

Коэффициент утонения, принятый при комбинированной вытяжке и протяжке как отношение номинальной толщины стенки изделия s_i (или вытяжного зазора z_i) к номинальной толщине заготовки s_{i-1} ($m_{s_i} = \frac{s_i}{s_{i-1}} = \frac{z_i}{s_{i-1}}$), весьма удобен для технологических расчетов, но является условным. При протяжке цилиндрическим пуансоном заготовки — стакана с постоянной (вдоль образующей) толщиной стенки этот коэффициент отражает действительное утонение стенки. Однако при протяжке такой заготовки коническим пуансоном и заготовок с переменной толщиной стенок любым пуансоном, а также во всех случаях комбинированной вытяжки использование условного коэффициента может привести к недооценке максимальных деформаций на различных этапах процесса. Этим, по-видимому, можно объяснить противоречивость данных, приведенных многими исследователями по коэффициентам утонения (табл. 2).

В связи с этим величину условных коэффициентов необходимо рассчитывать на основе значений истинных коэффициентов утонения, учитывающих изменение толщины заготовки в каждый данный момент формоизменения. Особенно важно учитывать истинный коэффициент утонения в критические моменты деформации.

Формула (3) позволяет разграничить влияние величин деформации по периметру (m_d) и деформации утонения (m_s) на глубину вытяжки. Это можно иллюстрировать следующим примером. Степень деформации на первом переходе комбинированной вытяжки по формуле (2) $\psi_k = 0,65$ можно получить, например, такими двумя вариантами комбинаций коэффициентов деформации:

$$a) m_{d_1} = 0,5; \quad m_{s_1} = 0,7; \quad б) m_{d_1} = 0,7; \quad m_{s_1} = 0,5.$$

Относительная глубина по формуле (3) соответственно равна:

$$a) H_{d_1} = 1,07; \quad б) H_{d_1} = 0,52.$$

Таблица 2
Коэффициент утонения m_{s_i} на различных операциях технологии протяжки

| Материал | Первая операция (свертка) | Вторая операция (протяжка) | Последующие операции протяжки | Источник |
|---------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------|
| Сталь жаропрочная | — | 0,50 (предельный) | 0,50 (предельный) | [41] |
| Латунь патронная | — | 0,50 | 0,65—0,75 | |
| То же | — | 0,60 | 0,62—0,65 | |
| Сталь мягкая | 0,96 | 0,74 | 0,55—0,57 | |
| Латунь Л68 | — | 0,55—0,57 | 0,55—0,57 | |
| Сталь мягкая | 1 | 0,40 } Пре- дельные | 0,50 } Пре- дельные | [50] |
| Латунь Л62 | 1 | | 0,50 | |
| Алюминий | 1 | | 0,50 | |
| Сталь коррозионно-стойкая | 1 | | 0,40 | |
| Сталь мягкая | — | 0,34 (предельный) | 0,34—0,4 | [19] |
| Латунь | 1,0 | 0,68 | 0,65—0,70 | [26, 34] |
| Сталь мягкая | 0,75 | 0,70 | 0,70 | |
| То же | — | 0,40—0,45 | 0,55—0,65 | |
| Латунь | — | 0,30—0,40 | 0,40—0,5 | |
| Алюминий | — | 0,35—0,40 | 0,50—0,60 | |
| Сталь мягкая | 0,71 0,6—0,66 | 0,70 0,62 | 0,73—0,75 0,62—0,68* | [1] |
| Латунь | 0,7 | 0,55 | 0,55 | РТМ-34-65 |
| Сталь мягкая | 0,75 | 0,65 | 0,65 | |
| Алюминий | 0,75 | 0,60 | 0,60 | |
| Сталь X18H10T | 1 | 0,76 | 0,76 | [4] |

* Коэффициенты, полученные при протяжке через две матрицы.

Видно, что по варианту а) производительность технологического процесса в 2 раза больше, хотя оба варианта представляют собой комбинированную вытяжку с одинаковой (суммарной) степенью деформации. Следовательно, больший эффект можно получить от комбинированной вытяжки с большей деформацией по периметру даже при меньшей деформации по толщине.

В табл. 3 даны расчетные (по средним значениям коэффициентов деформации) технологические параметры (по переходам) рассматриваемых методов вытяжки (для низкоуглероди-

Таблица 3
Сравнительная характеристика трех различных методов вытяжки [10, 34]

| Номер перехода вытяжки | Вытяжка | | Протяжка | | Комбинированная вытяжка | |
|------------------------|--------------|-----------|-----------------|----------|-------------------------|---------|
| | $\psi_B, \%$ | H_d | $\psi_{II}, \%$ | H_d | $\psi_K, \%$ | H_d |
| Первый | 40—52 | 0,45—0,80 | 40—45 | 0,4—0,55 | 67—75 | 1,2—1,5 |
| Второй | 20—27 | 0,8—1,6 | 30—45 | 0,6—0,95 | 35—60 | 2,5—5 |

стой стали), показывающие существенные преимущества комбинированной вытяжки.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ

Рассматривая последовательность формоизменения заготовки (например, на первом переходе) при любом из процессов глубокой вытяжки, нетрудно заметить две стадии.

Первая стадия формоизменения характеризуется пространственным изгибом с растяжением заготовки вокруг кромок матрицы и пуансона, постепенным увеличением поверхностей контакта и нарастанием технологического усилия. В момент приближения центра закругления пуансона к уровню верхней кромки рабочего пояса матрицы заготовка охватывает рабочую поверхность матрицы (торидальную или коническую); при этом контуры очага пластической деформации на данной стадии полностью определяются (рис. 3, а, 4, а, 5, а).

Момент совпадения центра закругления пуансона с уровнем верхней кромки рабочего пояса матрицы яв-

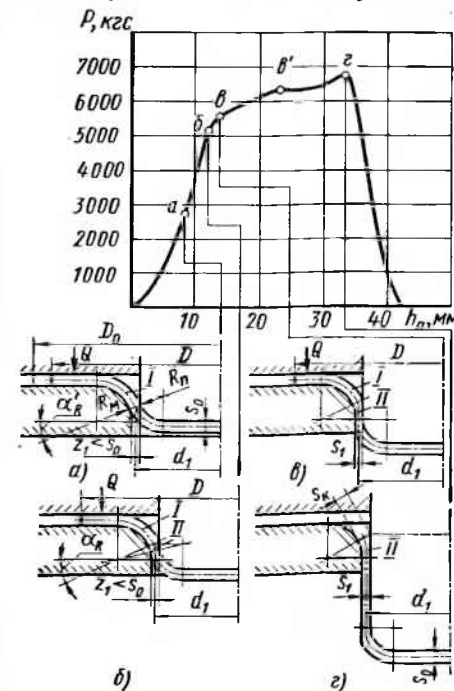


Рис. 3. Последовательность деформирования заготовки при комбинированной вытяжке на радиальной матрице со складкодержателем

ляется началом второй стадии (рис. 3, в, 4, в, 5, в). Вторая стадия при вытяжке характеризуется спрямлением в меридиональном сечении элементов фланца, изогнутых в первой стадии, уменьшением поверхности контакта заготовки с матрицей и уменьшением технологического усилия.

В процессах с принудительным утонением (протяжке, комбинированной вытяжке) между первой и второй стадиями имеется переходный этап, когда устанавливаются контуры зоны утонения очага деформации (рис. 3, б, 4, б, 5, б). На графиках усилие — путь это проявляется в резком подъеме кривой (участок $a-b$ на рис. 3, 4, 5). Спрявление заготовки, имеющее место при вытяжке, здесь заменяется сдвигом [9].

Как показывает практика, разрушение заготовки обычно происходит именно на этапе перехода первой стадии во вторую. Таким образом, смена стадий соответствует критическому моменту деформации.

Очаг деформации процесса комбинированной вытяжки в указанный момент имеет две зоны (см. рис. 3 и 4): I — зону вытяжки (зону утолщения) и II — зону принудительного утонения.

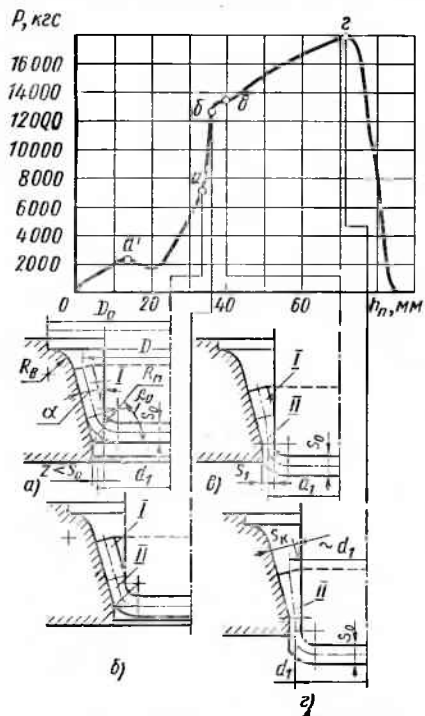


Рис. 4. Последовательность деформирования заготовки при комбинированной вытяжке на конической матрице без складкодержателя

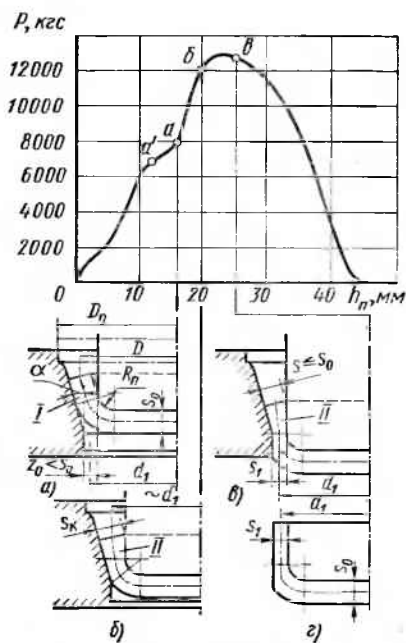


Рис. 5. Последовательность деформирования заготовки при протяжке из плоской заготовки («свертка» с утонением)

Если принять в качестве классификационного признака процесса наличие указанных зон в очаге пластической деформации в критический момент, можно построить простую схему в виде треугольника (рис. 6), в которой процесс вытяжки характеризуется наличием только зоны I, а процесс протяжки — наличием только зоны II. Такая схема показывает логическую взаимосвязь различных процессов глубокой вытяжки и позволяет установить границы перехода одного процесса в другой.



Рис. 6. Схема общей классификации процессов вытяжки

3. УСЛОВИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ГРАНИЦЫ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ ПРОЦЕССАМИ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ

Так как на первой стадии комбинированной вытяжки происходят явления, характерные для обычной вытяжки, то околодонная часть заготовки получает утонение (растяжение), которое в отличие от принудительного назовем произвольным.

Если принять, что в предельном случае (при теоретическом коэффициенте вытяжки) произвольное утонение стенки в опасном сечении соответствует равномерному относительному поперечному сужению ψ_p материала, то минимальное значение толщины стенки в этом сечении можно определить по формуле

$$s_{H \min} = (1 - \psi_p) s_0 \quad (6)$$

Произвольное утонение будет тем меньше, чем больше значение рабочего коэффициента вытяжки m_{d_i} по сравнению с теоретическим $m_{d_{it}}$. Тогда толщина стенки в нижней части вытягиваемого изделия

$$s_H = \frac{(1 - \psi_p) s_0}{1 - (m_{d_i} - m_{d_{it}})} \quad (7)$$

При $m_{d_i} = m_{d_{it}}$ формула (7) превращается в формулу (6).

Полностью комбинированной вытяжка будет в том случае, если принудительное утонение стенки начнется от самого дна вытягиваемой детали, т. е. если оно перекроет величину произвольного утонения.

Следовательно, верхний предел вытяжного зазора при комбинированной вытяжке с учетом произвольного утонения определяется соотношением

$$\frac{z_i}{s_0} \leq \frac{1 - \psi_p}{1 + m_{d_{it}} - m_{d_i}} \quad (8)$$

Учитывая, что $m_{d_{1r}} = \frac{1}{e} \approx 0,37$, формулу (8) можно переписать для первого перехода:

$$\frac{z_1}{s_0} \leq \frac{1 - \psi_p}{1,37 - m_{d_1}}. \quad (8')$$

При вытяжке вследствие сокращения периметра заготовки происходит также утолщение ее периферии. Чем выше степень вытяжки, тем больше утолщение заготовки.

Максимальную толщину края стенки вытянутого изделия можно определить по формуле

$$s_{1к} = s_0 \lambda_1. \quad (9)$$

Коэффициент утолщения λ_1 в функции коэффициента вытяжки в общем виде получаем из соотношения

$$\lambda_1 = \left(\frac{1}{m_{d_1}} \right)^f, \quad (10)$$

где f — показатель, зависящий от наличия анизотропии; $f = \frac{1}{1 + r_{cp}}$; r_{cp} — среднее значение коэффициента нормальной анизотропии исходного материала; $r_{cp} = \frac{\sum r_\theta}{5}$; r_θ — коэффициент

нормальной анизотропии материала под углом θ по отношению к направлению прокатки ($\theta = 0^\circ; 22^\circ 30'; 45^\circ; 67^\circ 30'; 90^\circ$), полу-

чаемый при испытаниях на растяжение; $r_\theta = \frac{\ln \frac{b_0}{b_x}}{\ln \frac{s_0}{s_x}}$; b_0 и b_x —

ширина образца до растяжения и после него; s_0 и s_x — толщина образца до растяжения и после него.

В случае изотропного материала $r_\theta = 1$, $f = \frac{1}{2}$ и

$$\lambda_1 = \frac{1}{\sqrt{m_{d_1}}}. \quad (10')$$

Исключить полностью принудительное утонение стенки на всем пути пуансона, т. е. осуществить «чистую» вытяжку, можно лишь, приняв величину относительного вытяжного зазора больше величины коэффициента утолщения:

$$\frac{z_1}{s_0} \geq \lambda_1. \quad (11)$$

Операция чистой вытяжки обеспечивает минимальное технологическое усилие, однако здесь весьма мало влияние полезного трения на пуансоне (что ограничивает степень вытяжки) и ве-

лика разница между верхним и нижним значениями диаметра и толщины стенки вдоль ее образующей.

Таким образом, на первом переходе границы полной комбинированной вытяжки и «чистой» вытяжки определяются соответственно выражениями (8) и (11).

Операции вытяжки, выполняемые с зазорами в широком промежутке между значениями, вычисленными по указанным формулам, имеют переходный характер. Особый интерес представляют операции, осуществляемые с зазорами в диапазоне следующих величин:

$$\frac{0,75}{\sqrt{m_{d_1}}} > \frac{z_1}{s_0} > \frac{1 - \psi_p}{1,37 - m_{d_1}}; \quad (12)$$

такую вытяжку можно назвать полукombинированной.

Действительно, здесь в матрицу вначале втягивается нижний участок стенки толщиной меньшей, чем величина зазора, и процесс идет как вытяжка. Затем, начиная примерно с относительной глубины $H_d \geq 0,35$, в зазор вступает утолщенная часть заготовки с первоначальным диаметром $D \geq 0,61D_0$, и процесс становится комбинированным, заканчиваясь протяжкой края. Учитывая, что при этом в критический момент вытяжки усилие повышается незначительно [32], а полезное трение на пуансоне увеличивается за счет уменьшенного зазора и частично разгружает опасное сечение, можно предполагать при полукombинированной вытяжке увеличение степени вытяжки по сравнению с вытяжкой без утонения и с комбинированной вытяжкой.

Принудительное утонение верхней половины стенки и калибровка нижней ее части обеспечивают более высокое, чем при вытяжке, качество изделия, а контактные условия на матрице при полукombинированной вытяжке благоприятнее, чем при комбинированной; поэтому для изделий с небольшой разницей в толщине дна и стенки такой метод вытяжки будет весьма эффективным.

Предположение о возможном увеличении степени вытяжки при зазорах по формуле (12) подтверждается экспериментами автора на конических матрицах и экспериментальной работой Э. Зибеля и Г. Коттхауса, выполненной на радиальных матрицах [51].

На рис. 7 показано изменение степени вытяжки различных материалов в зависимости от относительного зазора. Видно, что степень вытяжки возрастает именно в диапазоне значений зазоров, соответствующих полукombинированной вытяжке. Например, для низкоуглеродистой стали ($\psi_p \approx 0,2$) этот диапазон составляет

$\frac{z_1}{s_0} = 1,18 \div 0,85$. Расчет по соотношению (12) дает

$\frac{z_1}{s_0} = 1,12 \div 0,86$. При величинах зазоров, выходящих за верхний

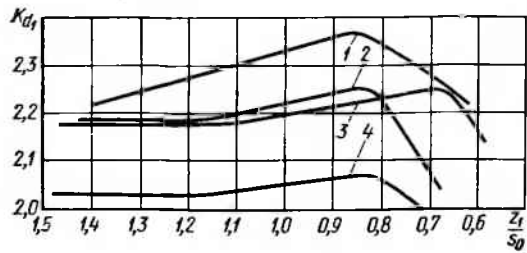


Рис. 7. Зависимость степени вытяжки от величины зазора при вытяжке на радиальной матрице [51]:
1 — латунь Л63; 2 — низкоуглеродистая сталь; 3 — хромоникелевая сталь; 4 — алюминий

предел этого диапазона, степень вытяжки остается неизменной, а при зазорах, величина которых меньше нижнего предела этого диапазона, т. е. при комбинированной вытяжке, степень вытяжки резко снижается до обычно рекомендуемых значений.

На практике обычно операции вытяжки выполняют в диапазоне величин зазоров

$$\frac{1}{\sqrt{m_{d1}}} > \frac{z_1}{s_0} > \frac{0,75}{\sqrt{m_{d1}}} \quad (13)$$

Следовательно, коэффициент c в формуле (1), принимаемый обычно из опытных данных, может быть вычислен для вытяжки по аналитической зависимости, учитывающей утолщение края заготовки:

$$c = \frac{0,75 \div 1,0}{\sqrt{m_{d1}}} - 1 \quad (14)$$

При зазорах по формуле (13) операция представляет собой вытяжку с протяжкой утолщенного края, т. е. последовательно имеются зоны I и II в очаге деформации. Так же, как при операции «чистой» вытяжки, здесь изделия получают невысокого класса точности, и степень вытяжки ограничивается неблагоприятными условиями деформации в критический момент, когда опасным сечением воспринимаются все составляющие напряжения. Границы между операциями, выполняемыми по схемам вытяжки, полукombинированной и комбинированной вытяжки, построенные по формулам (8'), (11), (12), (13), показаны на рис. 8, а. Здесь же показана граница значений m_{d1} , применяемых на практике.

Граница между комбинированной вытяжкой и протяжкой при прочих равных условиях (m_s и параметры инструмента) приближенно определяются следующими соотношениями, выведенными из уравнения неизменности объемов (при условии незначительного влияния закругления пуансона).

Для первой операции

$$m_{d1} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2s_{d1}}{\text{tg } \alpha} (1 + 2m_{s1} \text{tg } \alpha - m_{s1}^2)}}, \quad (15)$$

где $s_{d1} = \frac{s_0}{d_1}$ — относительная толщина дна изделия.

Если известна относительная толщина заготовки, то зависимость преобразуется:

$$m_{d1} = \sqrt{1 + \left[\frac{s_D}{\text{tg } \alpha} (1 + 2m_{s1} \text{tg } \alpha - m_{s1}^2) \right]^2} - \frac{s_D}{\text{tg } \alpha} (1 + 2m_{s1} \text{tg } \alpha - m_{s1}^2). \quad (16)$$



Формулы (15) и (16) можно использовать и для случая вытяжки на радиальных матрицах, если представить закругления кромки

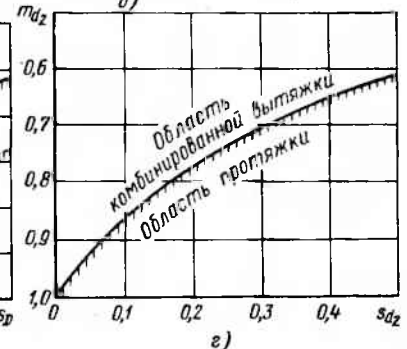
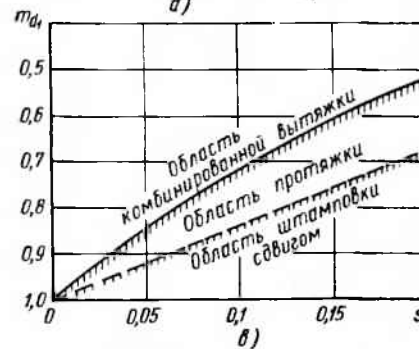
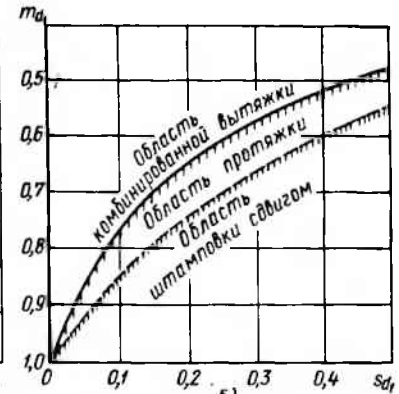


Рис. 8. Границы между различными процессами:

а — вытяжки, полукombинированной и комбинированной вытяжки (первый переход); б, в — комбинированной вытяжки, протяжки и штамповки сдвигом (первый переход); $m_{s1} = 0,65$; г — комбинированной вытяжки из утолщенной заготовки — стакана и протяжки (последующий переход); $\alpha = 15^\circ$; $m_s = m_{s1} m_{s2} = 0,65 \cdot 0,7 \approx 0,45$

матрицы в пределах зоны утонения в виде хорды, угол которой к оси вытяжки определяется формулой

$$\alpha = \frac{\alpha_R}{2} = \frac{\arccos \frac{R_{MS} + m_{s1}}{R_{MS} + 1}}{2}, \quad (17)$$

где $R_{MS} = \frac{R_M}{s_0}$.

Граница между комбинированной вытяжкой и протяжкой на последующей операции определяется формулой

$$m_{d_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2s_{d_i}}{\operatorname{tg} \alpha} (1 + 2m_s \operatorname{tg} \alpha - m_s^2)}}, \quad (18)$$

где $s_{d_i} = \frac{s_0}{d_i}$ — относительная толщина дна изделия; m_s — суммарный коэффициент утонения;

$$m_s = m_{s_1} m_{s_2} \dots m_{s_n} = \frac{z_i}{s_0} = \frac{z_i}{s_0}.$$

На рис. 8, б, в, г показаны эти границы, построенные соответственно по формулам (15), (16) и (18) для угла $\alpha = 15^\circ$ и разных относительных толщин. Выше каждой кривой имеется область комбинированной вытяжки, причем для существования комбинированного процесса на любой операции необходимо и достаточно, чтобы при данном m_d коэффициент утонения в начальный критический момент соответствовал выражению

$$m_{s_i} = \frac{z_i}{s_0} \leq \frac{1 - \psi_P}{1 + m_{d_{i+1}} - m_{d_i}}.$$

Если коэффициенты m_d равны значениям, рассчитанным по формулам (15), (16) и (18), или больше их, то процесс проходит по схеме, где в очаге деформации в критический момент имеется только зона II, что соответствует операции протяжки.

На рис. 8, б и в внутри области, соответствующей протяжке на первой операции, можно провести дополнительную границу, разделяющую ее на две части. Выше этой границы располагаются операции, характеризующиеся предварительным изгибом периферии заготовки в меридиональном сечении вокруг кромки пуансона (так называемая «свертка» с утонением), ниже — операции, протескающие без указанного изгиба.

Расчеты по формуле (16) показывают, что протяжка начинается при ширине свободного кольцевого участка заготовки $\frac{D_0 - d_n}{2} = (1,25 \div 1,5)s_0$, а это приводит к изгибу вокруг кромки пуансона и прилеганию этого участка к пуансону еще до момен-

та совпадения центра радиуса закругления последнего с уровнем верхней кромки рабочего пояска матрицы. Таким образом, получается как бы вытяжка стакана с последующей протяжкой, выполняемые за один ход прессы.

Если принять, что изгиб исключается при начальной ширине кольцевого участка заготовки

$$\frac{D_0 - d_n}{2} \leq s_0,$$

то получим процесс «штамповки сдвигом», который является особым видом «чистой» протяжки на первом переходе [6].

В процессе штамповки сдвигом можно отметить две характерные стадии.

Первая стадия процесса формоизменения (когда происходит осадка кромки заготовки, опирающейся на рабочую поверхность матрицы, и внедрение пуансона в центральную часть заготовки) по схеме деформации и по характеру кривой усилие — путь (рис. 9, а, б) напоминает начальные стадии процесса пробивки (смятие, сдвиг), но с зазором, исключая появление скальвающих трещин. Кроме того, эта стадия аналогична этапу образования зоны утонения в очаге пластической деформации при комбинированной вытяжке или при протяжке, когда происходит осадка (сплющивание) заготовки по кольцевой поверхности между кромкой пуансона и рабочей конической или торондальной поверхностью матрицы.

Первая стадия процесса завершается началом затекания центральной части заготовки в рабочий поясок матрицы и возникновением сдвиговой деформации в толще заготовки по конической поверхности, соединяющей кромки пуансона и верхние кромки рабочего пояска матрицы. По этой поверхности и происходит разрушение материала (при неправильном расчете процесса) в момент, когда технологическое усилие достигает максимума. Эксперименты показывают, что при прочих равных условиях это усилие несколько меньше усилия обычной операции протяжки,

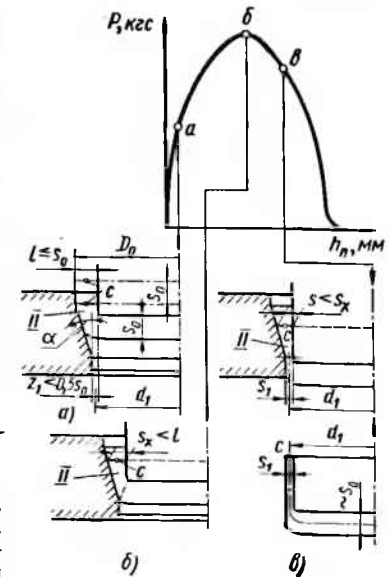


Рис. 9. Последовательность деформирования заготовки при штамповке сдвигом. Положение точки с на разных этапах формоизменения свидетельствует об отсутствии изгиба периферии заготовки

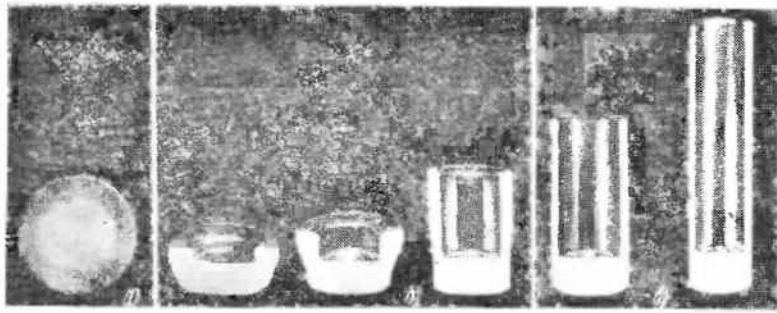


Рис. 10. Процесс штамповки сдвигом:

а — заготовка; б — стадии первой операции, выполненной через две матрицы; в — изделие после второй операции. Материал — алюминий А2; $D_0=30$ мм; $s_0=9,2$ мм; $s_D=0,31$; $K_T=3,1$; $d_n=16$ мм

значительно меньше усилия операции пробивки и в 10—20 раз меньше усилия обратного холодного выдавливания.

С начала затекания материала в рабочий поясок матрицы начинается вторая стадия, характеризующаяся протяжкой (сдвигом) кольцевого объема материала, заключенного между боковой поверхностью пуансона и конической поверхностью матрицы, через вытяжной зазор при убывающем усилии (рис. 9, б, в). На рис. 10 показана последовательность процесса штамповки сдвигом алюминиевого тонкостенного стакана с толстым дном. Штамповка сдвигом производилась через две матрицы (рис. 10, б): на верхней — собственно штамповка сдвигом, на нижней — протяжка. Здесь же (рис. 10, в) показано изделие после второй операции протяжки с незначительным утонением стенки.

Особенностью штамповки сдвигом, отличающей ее от обычной протяжки, является уменьшение объема зоны утонения уже на первой стадии, в то время как при операции протяжки из плоской заготовки зона утонения начинает уменьшаться лишь на второй стадии. В связи с этим необходимо различным образом оценивать утонение при протяжке и при штамповке сдвигом.

Условный коэффициент утонения при штамповке сдвигом по структуре формулы отличается от коэффициента утонения при протяжке. Его величина здесь зависит от начальной ширины свободного кольцевого объема заготовки:

$$m_{s_1} = \frac{2s_1}{D_0 - d_{n1}} \geq \frac{s_1}{s_0} \quad (19)$$

Так как фактически процесс протяжки при штамповке сдвигом начинается в критический момент (при максимальном уси-

лии), целесообразно оценивать возможности операции с учетом истинного коэффициента утонения m_{s_n} в указанный момент:

$$m_{s_n} = \frac{s_1}{s_x} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(1 - m_{d_1}^2) K_{T_1}^2 \operatorname{tg} \alpha}{2s_{d_1} m_{d_1}^2}}}, \quad (20)$$

где s_x — ширина свободной кольцевой поверхности в критический момент; K_{T_1} — степень тонкостенности изделия; $K_{T_1} = \frac{s_d}{s_1}$; s_d — толщина дна изделия, мм.

В связи с тем, что $s_x < \frac{D_0 - d_n}{2}$, $m_{s_n} > m_{s_1}$. Эта особенность штамповки сдвигом (заключающаяся в том, что истинная степень утонения меньше условной, обычно принимаемой в расчетах) открывает новые технологические возможности получения изделий с толстым дном и особо тонкими стенками. Заметим, что на первом переходе комбинированной вытяжки истинная степень утонения больше условной.

Для характеристики изделий, получаемых вытяжкой с принудительным утонением стенок, удобно пользоваться приведенным выше критерием степени тонкостенности K_T , показывающим, во сколько раз толщина стенки меньше толщины дна изделия. При комбинированной вытяжке и протяжке за первый переход можно получить степень тонкостенности, примерно обратно пропорциональную коэффициенту утонения:

$$K_{T_1} \approx \frac{1}{m_{s_1}} = K_{s_1}.$$

Если принять обычный для большинства материалов коэффициент утонения $m_{s_1} = 0,6 \div 0,7$, то степень тонкостенности изделий может быть $K_{T_1} = 1,45 \div 1,65$ (за один переход). По сравнению с этими значениями при штамповке сдвигом можно получить большие степени тонкостенности (например, $K_{T_1} = 4$) ввиду иной зависимости этого критерия от основных параметров процесса:

$$K_{T_1} = \sqrt{\frac{2s_{d_1} \left(\frac{1}{m_{s_{\text{пред}}}^2} - 1 \right)}{\left(\frac{1}{m_{d_1}^2} - 1 \right) \operatorname{tg} \alpha}}, \quad (21)$$

где $m_{s_{\text{пред}}}$ — предельный коэффициент утонения при протяжке для данного материала.

На рис. 11 показана зависимость K_{T_1} от m_{d_1} при различных s_{d_1} , вычисленная по формуле (21) для $m_{s_{\text{пред}}} \approx 0,4$ (сплошные

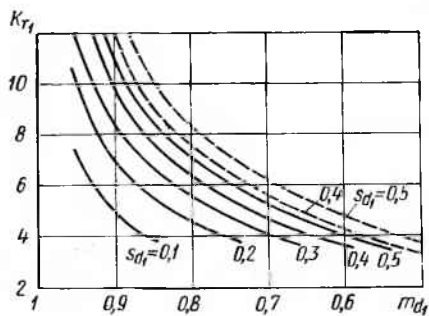


Рис. 11. Зависимость коэффициента уменьшения периметра m_{d_1} от степени тонкостенности K_{T_1} при штамповке сдвигом при различной относительной толщине дна изделия

кривые — алюминий, низкоуглеродистая сталь) и для $m_{s \text{ пред}} \approx 0,35$ (штриховые кривые — латунь).

Формула (21) выведена при условии, что истинный коэффициент утонения, вычисляемый по формуле (20), в критический момент равен предельному. По-видимому, при этом процессе действительно можно работать с предельным коэффициентом утонения, т. е. истинный коэффициент утонения фактически будет иметь большее значение, если его определять по соотношению $m_{s_{II}} = \frac{s_1}{s_{\text{хср}}} = \frac{2s_1}{s_x + s_1}$ с учетом клиновидного сечения очага деформации.

Коэффициент уменьшения периметра заготовки при штамповке сдвигом можно вычислить по формуле

$$m_{d_1} \geq \frac{1}{1 + s_{d_1} \left(2 - \frac{1}{K_{T_1}} \right)} \quad (22)$$

или после подстановки K_{T_1} из формулы (21) и преобразований

$$m_{d_1} \geq \frac{A}{B}, \quad (22')$$

где $A = 2(1 + 2s_{d_1}) \left(\frac{1}{m_{s \text{ пред}}^2} - 1 \right) +$

$$+ \sqrt{s_{d_1} \left[s_{d_1} \operatorname{tg} \alpha + 8s_{d_1} (1 + s_{d_1}) \left(\frac{1}{m_{s \text{ пред}}^2} - 1 \right) \right] \operatorname{tg} \alpha};$$

$$B = s_{d_1} \operatorname{tg} \alpha + 2(1 + 2s_{d_1})^2 \left(\frac{1}{m_{s \text{ пред}}^2} - 1 \right).$$

Расчеты по этой формуле показывают незначительную зависимость m_{d_1} от угла α в диапазоне углов, обычно принятых для операции протяжки. Наиболее благоприятными для процесса штамповки сдвигом, очевидно, являются углы матрицы около 10° . Заметим, что уменьшение угла матрицы приводит к увеличению толщины дна в процессе деформации.

Граница, разделяющая операции штамповки сдвигом и протяжки, рассчитана по формуле (22) для $m_{s \text{ пред}} = 0,4$ и нанесена на рис. 8, б (штриховая линия). Приблизительно эта граница может быть определена также по формуле

$$m_{d_1} \geq 1 - s_D \left(2 - \frac{1}{K_{T_1}} \right). \quad (22'')$$

Рассчитанная по этой формуле при $K_{T_1} = \frac{1}{m_{s \text{ пред}}}$ граница показана на графике (см. рис. 8, в) штриховой линией.

Если проанализировать с помощью соотношений (16) и (22) имеющиеся в литературе примеры так называемой свертки с утонением, которая используется в качестве первой операции с $m_{d_1} \approx 0,6 \div 0,7$ в технологических процессах протяжки [1, 30, 34] из заготовок с $s_D = 0,1 \div 0,2$, то можно убедиться, что эта операция чаще всего представляет собой протяжку (см. рис. 5) или операцию, близкую к протяжке (так как имеет зону I незначительных размеров). Последующие операции указанных технологических процессов также соответствуют протяжке, что следует из формулы (18). Применение протяжки на первой и последующих операциях объясняется спецификой тонкостенных изделий, которая требует большого суммарного уменьшения поперечного сечения при небольшом уменьшении диаметра.

Как уже отмечалось, большую степень тонкостенности, чем при «свертке» с утонением, можно получить штамповкой сдвигом, которая наряду с протяжкой и обратным выдавливанием может служить в качестве первой операции в технологии протяжки. По сравнению с протяжкой и комбинированной вытяжкой (когда торец стенки образован поверхностью среза заготовки) качество кромки изделий после штамповки сдвигом получается значительно более высоким (без фестонов и трещин) ввиду того, что в торец изделия переходит не поверхность среза заготовки, а поверхность листа (см. точку с на рис. 9).

Глава II. ПЕРВЫЙ ПЕРЕХОД КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫТЯЖКИ

1. ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОЙ ЗАГОТОВКИ

Последовательность деформирования заготовки при комбинированной вытяжке (см. рис. 3 и 4) показывает, что на первой стадии происходит процесс вытяжки, продолжающийся до полного прилегания заготовки к рабочей (тороидальной или конической) поверхности матрицы, граничащей с ее рабочим пояском.

При комбинированной вытяжке на радиальной или конической матрице со скругленным переходом в рабочий поясок этому моменту соответствует угол между линией, соединяющей центры радиусов скругления кромки матрицы и пуансона, и горизонталью (см. рис. 3, а):

$$\alpha'_R = \arccos \frac{R_{ms} + R_{ns} + m_{s1}}{R_{ms} + R_{ns} + 1} \quad (23)$$

Путь пуансона при этом на радиальной матрице

$$h_n = s_0 (R_{ms} + R_{ns} + 1) (1 - \sin \alpha'_R),$$

на конической матрице со скруглением R_M

$$h_n = h_m + s_0 [(R_{ns} + 1) (1 - \sin \alpha'_R) - R_{ms} \sin \alpha'_R].$$

При комбинированной вытяжке на конической матрице без скругления в месте перехода в рабочий поясок (см. рис. 4, а) угол между линией, соединяющей центр радиуса пуансона с точкой пересечения образующих конуса и рабочего пояса матрицы, и горизонталью определяется в указанный момент (перед началом принудительного утонения):

$$\beta_0 = \arctg \frac{1 - m_{s1} \cos \alpha + R_{ns} (1 - \cos \alpha)}{(m_{s1} + R_{ns}) \sin \alpha}, \quad (24)$$

а путь пуансона

$$h_n = h_m + \frac{s_0 [(1 + R_{ns}) \sin \alpha + m_{s1} \cos \alpha - 1 - R_{ns} (1 - \cos \alpha)]}{\sin \alpha}.$$

С точки зрения условий разрушения заготовки, процессы вытяжки с принудительным утонением (протяжка, комбинированная вытяжка, штамповка сдвигом) имеют общее принципиальное преимущество перед вытяжкой без утонения.

Как известно, при вытяжке опасное сечение заготовки локализуется или на участке донного закругления, примыкающем к вертикальной стенке, или в начале этой стенки. Разрыв заготовки происходит на границе, где заканчивается контакт ее с кромкой пуансона и сила трения между ними стремится к нулю. Этим можно объяснить, что на закруглении трещина возникает при небольшом ходе пуансона (на первой стадии), а в нижней части стенки — при входе пуансона в рабочий поясок матрицы (на второй стадии), когда заготовка уже полностью охватила кромку пуансона.

К разрушению заготовки, помимо других факторов, приводит малое упрочнение материала в этом месте, связанное лишь с изгибом и некоторым произвольным утонением.

Иные условия на рассматриваемом участке заготовки создает вытяжка с принудительным утонением.

При комбинированной вытяжке возникают два критических момента, когда возможно разрушение заготовки. Первый — переходный этап (начало утонения стенки), второй — конечный этап утонения стенки.

Как уже отмечалось (см. гл. I), переходный этап соответствует возникновению и развитию зоны принудительного утонения до ее стационарной формы.

Начало затекания материала в рабочий поясок матрицы (см. рис. 4, б) соответствует характерному граничному моменту переходного этапа. При этом могут быть два случая: 1) $\alpha'_R > \alpha$ (на радиальной матрице) или $\beta_0 > \alpha$ (на конической матрице) и 2) $\alpha'_R \leq \alpha$ или $\beta_0 \leq \alpha$. В первом случае переходный этап имеет две фазы. Начальная фаза характеризуется сложным напряженным состоянием, вызванным осадкой (сплющиванием) заготовки между кромкой пуансона и рабочей (конической или тороидальной) поверхностью матрицы. При этом встречное касательное перемещение рабочих инструментов с одновременным скольжением заготовки относительно матрицы и течение материала в сторону, противоположную перемещению пуансона, вызывает, во-первых, нарастающие растягивающие напряжения от силы трения по матрице и сопротивления зоны I, во-вторых, увеличивающуюся силу трения на поверхности заготовки, контактирующей с пуансоном (по закруглению и частично по боковой поверхности). Эта сила трения направлена по движению пуансона и, следовательно, выполняет полезную работу передачи части технологического усилия непосредственно в очаг пластической деформации (а не через дно заготовки).

В момент затекания материала в рабочий поясок матрицы сжимающие и растягивающие напряжения достигают величины,

достаточной для деформации сдвигом [9]. Как показывает макро- и микроанализ, сдвиг происходит примерно по поверхности, соединяющей верхнюю кромку рабочего пояска матрицы и верхнюю границу поверхности контакта заготовки с пуансоном (рис. 12). По аналогичной поверхности происходит и разрушение во второй фазе при неблагоприятных условиях деформации (см. линию перехода донного закругления в стенку на рис. 12, б).

Конечная фаза характеризуется окончательным оформлением зоны утонения, т. е. увеличением контакта заготовки с боковой поверхностью пуансона и деформацией сдвига в материале, получившем упрочнение в процессе изгиба с растяжением на первой стадии и осадки в начальной фазе переходного этапа.

Во втором случае ($\alpha_R \leq \alpha$ или $\beta_0 \leq \alpha$) переходный этап имеет только конечную фазу, т. е. процесс сразу после первой стадии носит характер сдвига в материале, который упрочнен незначительно (только за счет изгиба с растяжением). При этом сила трения τ на пуансоне еще весьма мала (рис. 13).

В соответствии с изложенным в первом случае технологическое усилие на переходном этапе будет больше, чем во втором, но и относительная прочность (отношение прочности стенки к напряжению в выходном ее сечении) или несущая способность опасного сечения в рассматриваемый момент при прочих равных условиях больше.

Было бы неверно объяснять эффект повышения несущей способности опасного сечения у дна в первом случае одним лишь упрочнением или одним разгружающим влиянием трения по

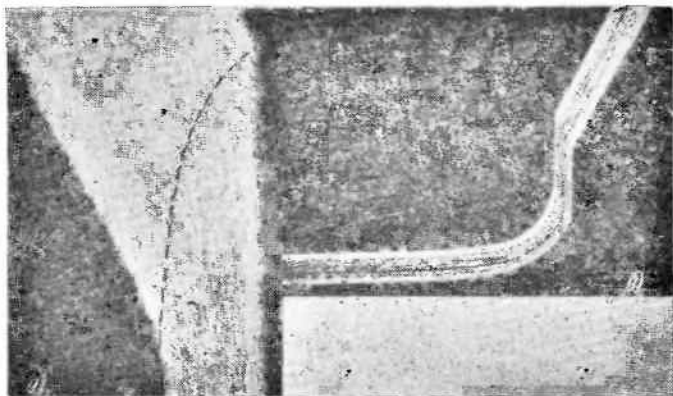


Рис. 12. Выявление границы между пластической и деформированной областями зоны утонения на микроснимке (а) $\times 63$ и на макроснимке (б). Материал — низкоуглеродистая сталь

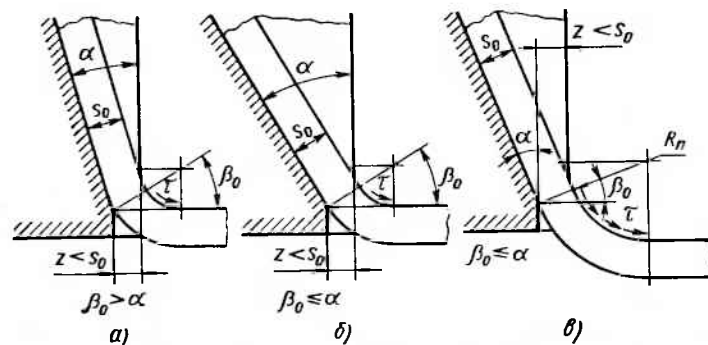


Рис. 13. Схемы комбинированной вытяжки на конической матрице с суммарным эффектом в начальный критический момент (а) и без этого эффекта при большом α (б) и при большом R_n (в)

пуансону. По-видимому, здесь оба указанных фактора создают суммарный эффект. Но и во втором случае несущая способность опасного сечения выше, чем при вытяжке, так как опасное сечение (часть донного закругления и прилегающая к нему стенка) упрочняется во второй фазе принудительным утонением и одновременно разгружается за счет увеличивающегося трения по пуансону, т. е. тоже создается суммарный эффект, хотя и меньший.

Роль трения на пуансоне в первом случае значительно больше, чем во втором. Суммарный эффект позволяет успешно преодолеть первый критический момент со значительной степенью деформации.

Необходимо отметить, что описанный суммарный эффект повышения несущей способности стенки у выхода из очага пластической деформации (выходного сечения) является общим закономерным свойством всех процессов с принудительным утонением: протяжки, штамповки сдвигом и комбинированной вытяжки, объясняющим их преимущество перед вытяжкой. Штамповка сдвигом вообще не может быть осуществлена без использования суммарного эффекта. Случаи выполнения комбинированной вытяжки или протяжки в неоптимальных условиях [на матрице с большим углом (рис. 13, б), пуансоном с большим радиусом закругления (рис. 13, в)] без суммарного эффекта в первой фазе являются исключением, кстати, подтверждающим правило, так как приводят к снижению степени деформации и относительной глубины.

Наличие суммарного эффекта повышения несущей способности выходного сечения (и разгрузки дна) заготовки иллюстрируют также данные экспериментов по комбинированной вытяжке (на первом и втором переходах) заготовок из латуни и алюминия пуансоном, практически не имевшим скругления кромки (рис. 14, а) [10].

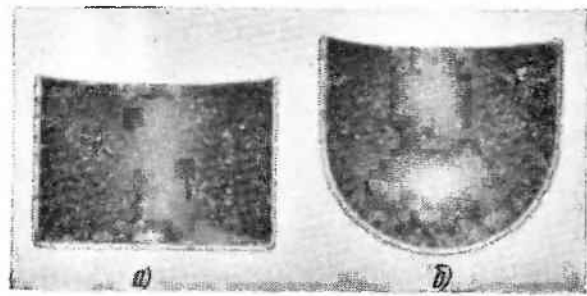


Рис. 14. Примеры первого перехода комбинированной вытяжки:

а — с большим суммарным эффектом повышения несущей способности опасного сечения, радиус пуансона $R_{II} \approx 0,2$ мм; б — с малым суммарным эффектом, радиус пуансона $R_{II} = \frac{d_1}{2}$.

Материала — латунь Л63; $m_{d_1} = 0,55$; $m_{s_1} \approx 0,6$; $\alpha = 20^\circ$

Вернемся к рассмотрению последовательности деформирования заготовки при комбинированной вытяжке. После достижения центром радиуса закругления пуансона уровня верхней кромки рабочего пояса матрицы начинается собственно комбинированный процесс, характеризующийся, как отмечалось в гл. I, наличием в очаге пластической деформации двух зон: зоны вытяжки I (утолщения) и зоны принудительного утонения II (см. рис. 3 и 4).

На этом этапе процесс деформации на первом переходе комбинированной вытяжки можно считать квазистационарным, так как зона II и по форме, и по размерам (если пренебречь утолщением фланца) на некотором участке пути пуансона остается постоянной, а объем зоны I непрерывно уменьшается.

Фактически же объем зоны утонения увеличивается за счет утолщения заготовки в зоне I. Он достигает наибольшей величины на завершающем этапе второй стадии, когда зона I исчезает и в зоне II происходит протяжка наиболее утолщенного края заготовки. Незадолго до конца операции возникает второй критический момент, когда совместное влияние напряжений от зоны I и от принудительного утонения утолщенного края заготовки в зоне II может вызвать отрыв ее верхнего края. Конец второй стадии представляет собой нестационарный процесс протяжки с уменьшающимся очагом деформации.

На графике усилие — путь этап собственно комбинированной вытяжки выражается в подъеме кривой от максимума, соответствующего переходу к комбинированному процессу (см. рис. 3, и 4, точки θ), до максимума, соответствующего окончанию комбинированного процесса (см. рис. 3 и 4, точки ζ), а конечный этап протяжки — крутым спадом усилия до нуля.

2. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫТЯЖКИ

Анализ напряженного состояния заготовки при вытяжке (без утонения) достаточно подробно выполнен И. А. Норицыным [31] и Е. А. Поповым [32, 36] методом совместного решения при-

ближенных уравнений равновесия с энергетическим условием пластичности.

Ценность теоретического анализа, проведенного И. А. Норицыным, заключается в том, что им впервые было дано решение задачи с учетом напряженного состояния как на плоском, так и на радиальном участках фланца. Кроме того, им впервые была выведена аналитическая формула для определения предельного коэффициента вытяжки с учетом основ-

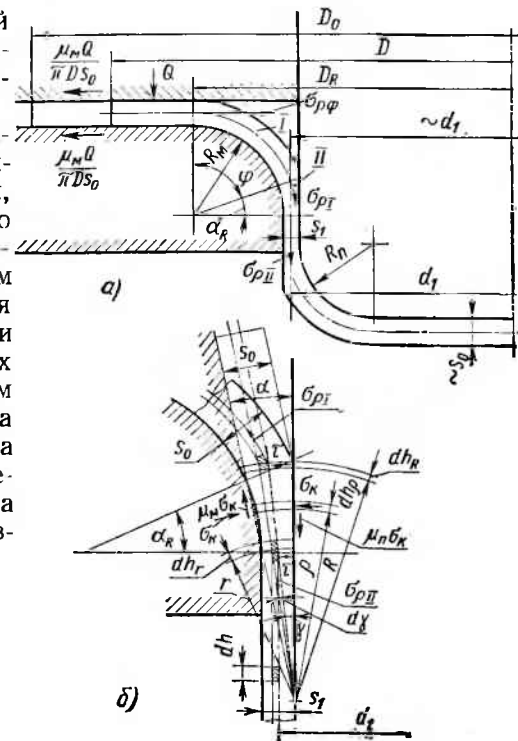


Рис. 15. Схема к теоретическому анализу комбинированной вытяжки:

а — схема первого перехода на радиальной матрице; б — обобщенная схема напряженного состояния зоны II на радиальной и конической матрицах

ных факторов, влияющих на процесс вытяжки. Более простая приближенная формула предельного коэффициента вытяжки была предложена позднее Е. А. Поповым.

Теоретический анализ напряженного состояния при комбинированной вытяжке выполнен автором книги смешанным методом. Смешанный метод анализа состоит в том, что зона I анализируется путем совместного решения приближенных уравнений равновесия с приближенным энергетическим условием пластичности, а зона II — путем решения уравнения баланса работ внешних и внутренних сил с использованием граничного условия, по которому на верхней границе зоны II имеется противонапряжение, равное растягивающему напряжению от зоны I (рис. 15).

Приближенное энергетическое уравнение пластичности в зоне I

$$\sigma_p - \sigma_\theta = \beta_I \sigma_{sI}. \quad (25)$$

Растягивающее напряжение в конце зоны I очага пластической деформации (рис. 15) при $\beta_I \approx 1,1$:

$$\sigma_{pI} = 1,1 \sigma_{sI} \left(\ln \frac{D}{d_1} + \frac{2\mu_m Q}{1,1 \sigma_s \pi D S_0} + \frac{s_0}{4R_{MC}} \right) e^{\mu_m \varphi}. \quad (26)$$

В связи с тем, что здесь рассматривается геометрия матрицы с радиусом $R_M = (6 \div 10)s_0$, обычно принятая для вытяжки и использованная в некоторых экспериментах по комбинированной вытяжке, диаметр края заготовки уменьшается к концу первой и к началу второй стадии незначительно. Поэтому приближенно можно принять $D \approx D_0$ и $\sigma_{\rho I} \approx \sigma_{\rho I_{\max}}$. Тогда, полагая, по Е. А. Попову, что усилие прижима

$$Q_{\max} \approx 0,1 \left(1 - \frac{18s_D}{1 - m_{d_1}} \right) \frac{P_{\max}}{m_{d_1}^2} \text{ и } \varphi = 90^\circ - \alpha_R,$$

после подстановки в формулу (26) и преобразований с учетом формулы (17) получим выражение для максимального напряжения в зоне I в критический момент

$$\sigma_{\rho I_{\max}} = 1,1\sigma_{sI} \frac{\left(\ln \frac{1}{m_{d_1}} + \frac{s_0}{4R_M} \right) (1 + 1,5\mu_M)}{1 - \frac{0,2\mu_M (1 + 1,5\mu_M)}{m_{d_1}} \left(1 - \frac{18s_D}{1 - m_{d_1}} \right)}, \quad (27)$$

где

$$\sigma_{sI} \approx \frac{\sigma_B}{1 - \psi_P} \left(\frac{1 - m_{d_1}}{\psi_P} \right)^{\frac{\psi_P}{1 - \psi_P}}.$$

При переходе в зону принудительного утонения в уравнении пластичности тангенциальное напряжение сжатия σ_θ сменяется нормальным к поверхности инструмента контактным напряжением сжатия σ_K :

$$\sigma_\rho - \sigma_K = \beta_{II}\sigma_{sII}. \quad (28)$$

Так как в зоне утонения уменьшение среднего периметра незначительно из-за большой разницы между поперечным размером вытягиваемой детали и толщиной его стенки, можно принять, что деформация здесь происходит по схеме, близкой к плоской. Ввиду незначительного влияния касательных напряжений на величину и направление нормальных напряжений можно считать, с некоторым приближением, нормальные напряжения в зоне утонения главными.

Тангенциальное нормальное напряжение в зоне утонения становится средним между осевым растягивающим и нормальным к контактным поверхностям, сжимающим напряжениями:

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_\rho + \sigma_K}{2}. \quad (29)$$

Объемная схема напряженного состояния в зоне утонения при комбинированной вытяжке, сохраняя преимущества перед плоской схемой при вытяжке без утонения, несколько отличается от объемной схемы при протяжке, так как противона-

тяжение снижает величину контактных напряжений на поверхностях пуансона и матрицы. Это имеет положительное значение с точки зрения стойкости вытяжного инструмента, но, как будет показано далее, несколько ограничивает степень утонения по сравнению с достижимой при протяжке ввиду уменьшения полезного трения на пуансоне.

Анализ напряженного состояния заготовки на тороидальной поверхности рабочей кромки матрицы даже при вытяжке, т. е. в предположении, что толщина заготовки не изменяется, весьма сложен [31]. Добавление деформации принудительного утонения при комбинированном процессе еще более осложняет задачу.

Для упрощения анализа представим тороидальную контактную поверхность матрицы в пределах зоны II в виде конической, образующая которой наклонена к оси вытяжки под углом $\alpha = \frac{\alpha_R}{2}$ (см. рис. 15). Это дает возможность построить общую схему очага пластической деформации при любой геометрии матрицы и выполнить обобщенный теоретический анализ комбинированной вытяжки.

Смещения, на которых совершаются элементарные работы внешних и внутренних сил, определим на основе элементарного перемещения пуансона dh из условия постоянства объема [36]:

$$dh = \frac{\alpha}{\sin \alpha} dh_r;$$

$$dh_R = \frac{r}{R} dh_r;$$

$$dh_\rho = \frac{r}{\rho} dh_r;$$

$$dh_{\rho II} = \left(\frac{r}{\rho} - 1 \right) dh_r.$$

Примем, что сдвиговая деформация происходит дважды, т. е. на входе в зону II и на выходе из нее.

Приближенно можно принять величину касательных напряжений на указанных границах максимально возможной, т. е.

$$\tau = \tau_s = \frac{1,15\sigma_{sII}}{2}.$$

Уравнение работ внешних и внутренних сил для зоны II в дифференциальном виде:

$$dA = dA_{нд} + dA_\sigma + dA_{\tau_R} + dA_{\tau_r} + dA_{\tau_M} + dA_{\tau_{II}}, \quad (30)$$

где элементарная работа деформации идеальная

$$dA_{нд} = \int_V \int \sigma_i de_i dV = 1,15\sigma_{sII} \alpha r dh \ln \frac{R}{r}$$

(V — объем зоны II);

элементарная работа на границе зон I и II от противонапряжения

$$dA_{\sigma} = \int_0^{\alpha} \sigma_{\rho I} R dh_R d\gamma = \sigma_{\rho I} \alpha r dh_r;$$

работа сдвиговых деформаций на верхней границе зоны II

$$dA_{\tau_R} = \int_0^{\alpha} \tau_s dh_r \frac{r}{R} \operatorname{tg} \gamma R d\gamma \approx 1,15 \sigma_{sII} r dh_r \sin^2 \frac{\alpha}{2};$$

работа сдвига на нижней границе зоны II

$$dA_{\tau_r} = \int_0^{\alpha} \tau_s dh_r \operatorname{tg} \gamma r d\gamma \approx 1,15 \sigma_{sII} r dh_r \sin^2 \frac{\alpha}{2};$$

работа от контактного трения на матрице

$$dA_{\tau_M} = \int_r^R \mu_M \sigma_K r dh_r \frac{d\rho}{\rho} = 1,15 \mu_M \sigma_{sII} r dh_r \times \\ \times \left(1 - 0,5 \ln \frac{R}{r} - \frac{\sigma_{\rho I}}{1,15 \sigma_s} \right) \ln \frac{R}{r};$$

работа сил контактного трения по пуансону при $dh_{\rho_n} = \left(\frac{r}{\rho} - 1 \right) dh_r$

$$dA_{\tau_n} = \int_r^R \mu_n \sigma_K dh_r \left(\frac{r}{\rho} - 1 \right) d\rho = -1,15 \mu_n \sigma_{sII} r dh_r \times \\ \times \left[0,5 \left(\ln \frac{R}{r} \right)^2 - \frac{\sigma_{\rho I}}{1,15 \sigma_{sII}} \left(\frac{R}{r} - 1 - \ln \frac{R}{r} \right) \right],$$

где

$$\sigma_K = 1,15 \sigma_{sII} \left(1 - \ln \frac{R}{\rho} - \frac{\sigma_{\rho I}}{1,15 \sigma_{sII}} \right). \quad (31)$$

Подставляя значение элементарных работ в выражение (30) и принимая $r = \frac{s_1}{\sin \alpha}$; $R = \frac{s_0}{\sin \alpha}$, получаем выражение для элементарной работы активных сил. При этом осевое напряжение в выходном сечении стенки в начале второй стадии

$$\sigma_{z_1} = 1,15 \sigma_{sII} \left\{ \left[1 + \frac{\mu_M}{\sin \alpha} \left(1 - \frac{\sigma_{\rho I \max}}{1,15 \sigma_{sII}} \right) - \frac{\mu_n + \mu_M}{2 \sin \alpha} \ln \frac{1}{m_{s1}} \right] \times \right. \\ \left. \times \ln \frac{1}{m_{s1}} + \frac{\sigma_{\rho I \max}}{1,15 \sigma_{sII}} + \frac{\sin \alpha}{2} \right\}, \quad (32)$$

где

$$\sigma_{sII} = \sigma_B \left(\frac{1 - m_{d1} m_{s1}}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}}.$$

Для конечного этапа утонения (края) стенки ($\sigma_{\rho I} = 0$)

$$\sigma_{z_k} = 1,15 \sigma_{s_k} \left\{ \left[1 + \frac{2\mu_M - (\mu_n + \mu_M) \ln \frac{1}{m_{s_k}}}{2 \sin \alpha} \right] \ln \frac{1}{m_{s_k}} + \frac{\sin \alpha}{2} \right\}, \quad (33)$$

где

$$m_{s_k} = \frac{s_1}{s_{k1}} \approx m_{s1} \sqrt{m_{d1}};$$

$$\sigma_{s_k} = \sigma_B \left(\frac{1 - m_{d1} m_{s_k}}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}}.$$

Формулы (32) и (33) являются общими для радиального и конического профилей матрицы и для любого перехода. При $\mu_M = \mu_n = \mu$ формула (33) превращается в формулу Е. А. Попова для протяжки, если принять $1,15 \approx 1$ и $\sin \alpha \approx \alpha$:

$$\sigma_z = \sigma_s \left[\ln \frac{1}{m_{s1}} + \frac{\alpha}{2} + \frac{\mu}{\alpha} \left(1 - \ln \frac{1}{m_{s1}} \right) \ln \frac{1}{m_{s1}} \right]. \quad (33')$$

Рассматривая структуру формулы (32), можно отметить, что напряжение в стенке в начальный критический момент комбинированной вытяжки в значительной мере зависит от величины напряжения в зоне I в начале второй стадии, т. е. от величины противонапряжения, а именно: чем больше противонапряжение, тем больше растягивающее напряжение в опасном сечении.

Условие прочности стенки при комбинированной вытяжке можно записать без учета радиуса закругления пуансона, так как его роль здесь меньше, чем при вытяжке:

$$\sigma_z \leq \sigma_{s \max}. \quad (34)$$

Общий принцип интенсификации процессов вытяжки состоит в увеличении $\sigma_{s \max}$ или в уменьшении σ_z [8, 44].

Как отмечалось, комбинированная вытяжка обеспечивает повышение несущей способности стенки в опасном сечении не только в результате ее непосредственного упрочнения, но и за счет разгрузки путем увеличения трения по пуансону (суммарный эффект). Кроме того, значительный резерв интенсификации процесса открывает оптимизация условий деформирования, которая способствует уменьшению σ_z .

Оптимальные условия осуществления комбинированной вытяжки включают три фактора: оптимальные параметры вытяжного инструмента; оптимальные комбинации коэффициентов

деформации по периметру и толщине заготовки; оптимальные контактные условия.

Формула (32) показывает, что все эти факторы оптимизации процесса взаимно связаны между собой. Например, изменяя параметры вытяжного инструмента (R_m , α), можно влиять не только на величину растягивающего напряжения в стенке (а следовательно, и на величину коэффициентов деформации), но и на величину противонапряжения (σ_{pl}), которая, в свою очередь, влияет на величину напряжения в стенке и на значения контактных давлений на инструмент в зоне утонения.

Оптимальные условия зависят от технологических задач, которые возникают в определенных технологических ситуациях. Последние можно различать по таким основным конструктивным параметрам изделия, как большая относительная глубина (длина) H_d и большая степень тонкостенности K_T .

В одних случаях (изделия с большой H_d) задача заключается в обеспечении оптимальных условий для наибольшей деформации по периметру заготовки. Утонение здесь будет играть подчиненную роль. Оптимальными для данных случаев будут параметры инструмента, уменьшающие растягивающие напряжения как на первой, так и на второй стадиях. Параметры матрицы $R_m = (6 \div 10)s_0$ или $\alpha = 30 \div 45^\circ$ и большой радиус кромки пуансона R_n , не являющиеся оптимальными для совмещения больших деформаций по периметру и толщине, также дают весьма удовлетворительные результаты при полукombинированной вытяжке и комбинированной вытяжке с небольшим утонением (см. рис. 7), обеспечивая значительную степень вытяжки и относительную глубину.

Большое противонапряжение от зоны I на радиальной матрице с малым R_m , складывающееся в критический момент из составляющих от трения под прижимом, от изгиба и трения на закруглении и от значительной величины внешнего периметра ($D \approx D_0$), ограничивает степень деформации (главным образом утонение).

Однако для материалов, принудительное утонение которых ограничено налипанием на инструмент и для которых еще не найдены достаточно надежные технологические смазки (например, для нержавеющей сталей), параметры инструмента, обеспечивающие большое противонапряжение и тем самым облегчающие контактные условия в зоне утонения, по-видимому, можно успешно использовать для комбинированной вытяжки с небольшим утонением. Больших значений относительной глубины здесь можно достичь, применяя более высокую степень вытяжки и используя значительное произвольное утонение при расчете оптимального вытяжного зазора по формуле (12).

В других случаях (при большом значении K_T) задачей является обеспечение оптимальных условий для наибольшего принудительного утонения заготовки. Уменьшение периметра здесь играет подчиненную роль.

Получение значительных утонений в обоих случаях связано с ухудшением контактных условий трения в зоне утонения, поэтому успех зависит, во-первых, от антифрикционных свойств трущихся пар (заготовка — инструмент), во-вторых, от надежных технологических смазок (например, фосфатирование, меднение для углеродистых сталей), предотвращающих налипание и задиры на контактных поверхностях.

Одним из путей решения задачи увеличения возможности утонения для материалов, не налипающих на инструмент, является уменьшение противонапряжения при комбинированном процессе за счет оптимизации условий расчленения процесса на стадии.

3. УСЛОВИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РАСЧЛЕНЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЫТЯЖКИ НА СТАДИИ

Из рис. 3 следует, что при $R_m = (6 \div 10)s_0$, обычно используемом на практике, в начале второй стадии вытяжки фланец заготовки еще деформируется под складкодержателем. Следовательно, здесь накладывается первая стадия на вторую, что вызывает и увеличение растягивающего напряжения в опасном сечении, и смещение максимума усилия вытяжки (без утонения) ближе к концу операции.

При любом методе вытяжки уменьшение растягивающего напряжения в опасном сечении стенки позволяет интенсифицировать процесс.

Опасное сечение можно разгрузить в большей или меньшей мере, если расчленим процесс формоизменения заготовки в одном штампе на стадии с учетом характера изменения составляющих напряжения вытяжки по пути пуансона таким образом, чтобы их максимумы не совпадали по времени с максимумом растягивающего напряжения во фланце заготовки. Заметим, что последний максимум наблюдается при диаметре края фланца $D = (0,75 \div 0,85)D_0$.

Оптимальное расчленение процесса заключается в том, что на каждой стадии заготовке сообщается степень деформации, обеспечивающая устойчивый процесс при небольших усилиях, причем последующая стадия начинается в фазе снижения усилия предыдущей стадии. Значительный эффект интенсификации процесса объясняется тем, что максимальные усилия стадий не складываются, благодаря чему уменьшаются растягивающие напряжения в стенке, а общий коэффициент деформации равен произведению коэффициентов вытяжки и утонения, полученных на каждой стадии. Кроме того, уменьшение максимального усилия на операции способствует улучшению условий работы штампов, увеличению точности изделий и уменьшению затрат на оборудование.

На первом переходе вытяжки с плоским складкодержателем оптимальным будет расчленение на следующие стадии: пер-

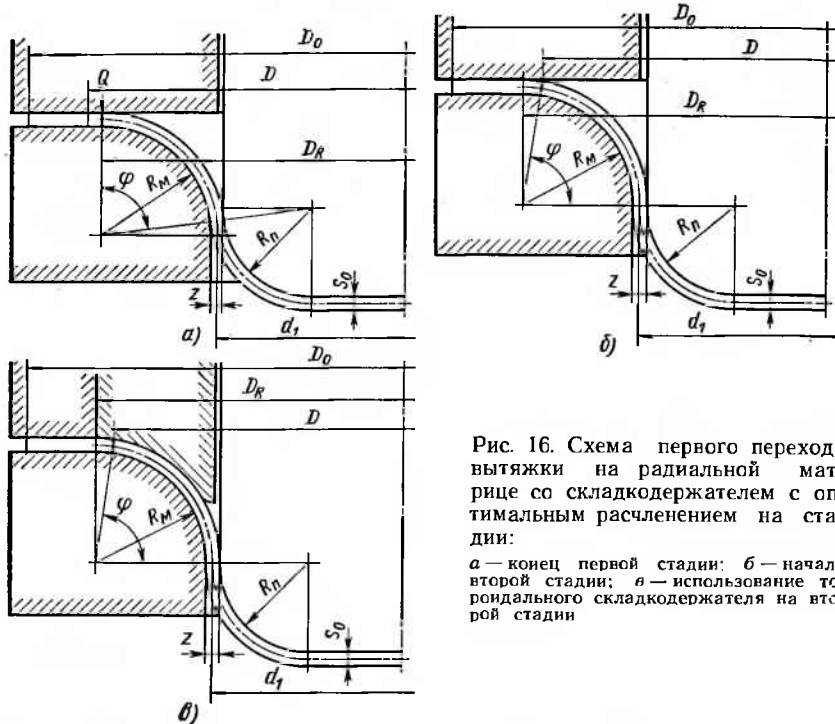


Рис. 16. Схема первого перехода вытяжки на радиальной матрице со складкодержателем с оптимальным расчленением на стадии:
 а — конец первой стадии; б — начало второй стадии; в — использование тороидального складкодержателя на второй стадии

вая — деформирование заготовки до выхода края из-под складкодержателя и до начала втягивания ее в рабочий поясок матрицы; вторая — деформирование заготовки на входе в рабочий поясок, но без участия плоского складкодержателя.

При вытяжке без складкодержателя расчленение на стадии будет оптимальным, если в начальный критический момент комбинированной вытяжки противонапряжение мало.

Радиальные матрицы. Условие оптимального расчленения процесса на радиальной матрице с плоским (рис. 16, а, б) и с тороидальным на второй стадии (рис. 16, в) складкодержателем можно записать при перемещении пуансона $h_{п} \approx R_{мс} + R_{пс}$ исходя из величины текущего диаметра края заготовки

$$D \leq D_R, \quad (35)$$

где D_R — диаметр окружности центров радиуса кромки матрицы;
 $D_R = d_1 + 2R_{мс}$.

Противонапряжение от зоны I в начальный критический момент комбинированной вытяжки ($s_D < \frac{1-m_{d_1}}{18}$)

$$\sigma_{p1} = 1,1\sigma_{s1} (1 + \mu_m \varphi) \ln \frac{1}{m_{d_1}}, \quad (36)$$

где $m_{d_1}^*$ — коэффициент вытяжки на второй стадии; $m_{d_1}^* = \frac{m_{d_1}}{m_{d_1}^r}$
 $m_{d_1}^r$ — коэффициент вытяжки на первой стадии; $m_{d_1}^r = \frac{D_R}{D_0} = \frac{d_1 + 2R_{мс}}{D_0}$; $\varphi \approx 90^\circ - 10^\circ$.

Радиус закругления матрицы в этом случае рассчитывается из условия постоянства объема по формуле

$$R_{мс} = 0,69d_1 \left(0,16 \sqrt{\frac{18,3}{m_{d_1}^2} + 21,2 + 10,2 \left(\frac{R_{пс}}{d_1}\right)^2} - 41,6 \frac{R_{пс}}{d_1} - 1 \right). \quad (37)$$

Однако в связи со значительной степенью вытяжки без складкодержателя на второй стадии (коэффициенты вытяжки $m_{d_1}^* \approx 0,82 \div 0,6$, $m_{d_1}^r \approx 0,55 \div 0,75$) необходимо проверить границы применимости такой схемы по одному из соотношений устойчивости фланца на второй стадии. Например, фланец заготовки на второй стадии будет устойчив, если

$$s_D \geq \frac{m_{d_1}^* - m_{d_1}}{20}, \quad (38)$$

или, с учетом упрочнения,

$$s_D \geq \frac{1 - \psi_p \ln \frac{1}{m_{d_1}} - m_{d_1}}{20}. \quad (38')$$

Если s_D меньше указанной величины, рекомендуется использовать на первой стадии плоский, а на второй стадии тороидальный складкодержатель [28]. Противонапряжение в этом случае будет несколько больше (на величину составляющей от трения под складкодержателем), но степень вытяжки тонколистовых заготовок значительно повысится.

На радиальной матрице без складкодержателя, т. е. при $s_D \geq \frac{1-m_{d_1}}{18}$, условие оптимального расчленения на стадии в момент начала второй стадии выражается соотношением

$$D \leq d_1 + 2R_{мс}(1 - \cos \varphi), \quad (39)$$

где $R_{мс} \approx \frac{d_1(1-m_{d_1})}{2m_{d_1}}$;

$$\varphi \approx \frac{200 \left[1 - m_{d_1} \left(1 + 2,28 \frac{R_{пс}}{d_1} \right) \right]}{1 + m_{d_1}(5 - 6m_{d_1})}. \quad (40)$$

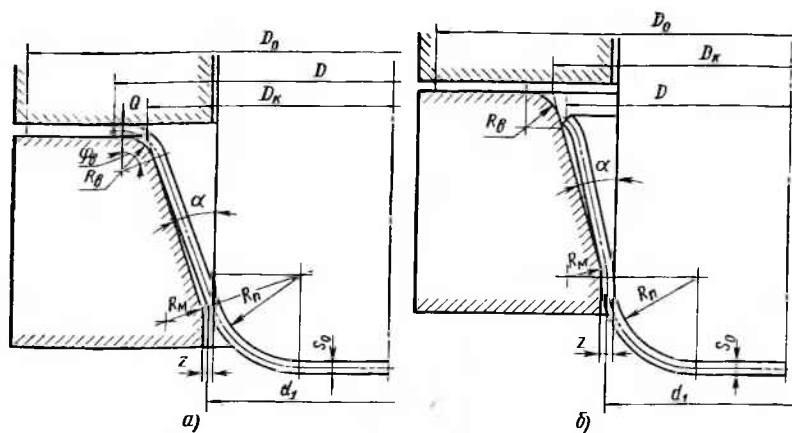


Рис. 17. Схема первого перехода вытяжки на одноконусной матрице со складкодержателем с оптимальным расчленением на стадии:
 а — конец первой стадии; б — начало второй стадии

Противонапряжение в этом случае можно вычислить по формуле (36) с подстановкой

$$m_{d_1}'' = \frac{m_{d_1}}{m_{d_1}'} ;$$

$$m_{d_1}' = m_{d_1} \left[1 + 2 \frac{R_{nc}}{d_1} (1 - \cos \varphi) \right].$$

Конические матрицы. Условие оптимального расчленения процесса на конической матрице с плоским складкодержателем (рис. 17) в момент начала деформации заготовки на входе в рабочий пояс:

$$D \leq D_K \quad (41)$$

где D_K — диаметр входной кромки конуса матрицы.

Приблизительно этот диаметр может быть вычислен из условия равенства боковой поверхности изделия, вытянутого без утонения, и поверхности рабочего конуса матрицы¹:

$$D_K = d_1 \sqrt{\left[\frac{1}{m_{d_1}^2} - 1 - 2,28 \frac{R_{nc}}{d_1} + 0,07 \frac{\alpha^2 R_{nc}}{d_1} + 0,56 \left(\frac{R_{nc}}{d_1} \right)^2 \right] \sin \alpha + 1} \quad (42)$$

или без учета радиуса кромки пуансона

$$D_K \approx d_1 \sqrt{\left(\frac{1}{m_{d_1}^2} - 1 \right) \sin \alpha + 1} \quad (42')$$

¹ См. сноску 1 на стр. 109.

Величину противонапряжения в начальный критический момент комбинированной вытяжки можно получить из совместного решения приближенного уравнения равновесия для конической оболочки постоянной толщины (зона I) с приближенным энергетическим условием пластичности [8]:

$$\sigma_{01} = 1,1 \sigma_{s1} (1 + \mu_m \operatorname{ctg} \alpha) \ln \frac{1}{m_{d_1}''} \quad (43)$$

где

$$m_{d_1}'' = \frac{m_{d_1}}{m_{d_1}'} ;$$

$$m_{d_1}' = \frac{D_K}{D_0} \approx \sqrt{(1 - m_{d_1}^2) \sin \alpha + m_{d_1}^2}.$$

Расчеты показывают (табл. 4 и 5), что в диапазоне $m_{d_1} = 0,45 \div 0,6$ и $\alpha = 10 \div 20^\circ$ $m_{d_1}' = 0,585 \div 0,76$ и $m_{d_1}'' = 0,86 \div 0,66$,

Таблица 4

Значения $m_{d_1}' = \frac{D_K}{D_0}$ при различных углах конической матрицы и коэффициентах

| m_{d_1} | вытяжки | | | | | | | | |
|-----------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | α° | | | | | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| 0,4 | 0,48 | 0,55 | 0,62 | 0,67 | 0,72 | 0,75 | 0,80 | 0,84 | 0,86 |
| 0,45 | 0,52 | 0,58 | 0,64 | 0,69 | 0,73 | 0,77 | 0,81 | 0,85 | 0,87 |
| 0,5 | 0,56 | 0,62 | 0,67 | 0,71 | 0,75 | 0,79 | 0,82 | 0,86 | 0,88 |
| 0,55 | 0,6 | 0,65 | 0,69 | 0,73 | 0,77 | 0,81 | 0,84 | 0,87 | 0,89 |
| 0,6 | 0,64 | 0,69 | 0,72 | 0,76 | 0,80 | 0,82 | 0,86 | 0,88 | 0,90 |
| 0,65 | 0,69 | 0,72 | 0,76 | 0,79 | 0,82 | 0,84 | 0,87 | 0,89 | 0,91 |

Таблица 5

Значения $m_{d_1}'' = \frac{d_1}{D_K}$ при различных углах конической матрицы и коэффициентах

| m_{d_1} | вытяжки | | | | | | | | |
|-----------|----------------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| | α° | | | | | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| 0,4 | 0,84 | 0,72 | 0,65 | 0,60 | 0,56 | 0,53 | 0,50 | 0,48 | 0,46 |
| 0,45 | 0,86 | 0,77 | 0,705 | 0,66 | 0,61 | 0,58 | 0,56 | 0,53 | 0,51 |
| 0,5 | 0,89 | 0,81 | 0,75 | 0,705 | 0,67 | 0,63 | 0,6 | 0,58 | 0,57 |
| 0,55 | 0,91 | 0,83 | 0,77 | 0,725 | 0,685 | 0,66 | 0,63 | 0,6 | 0,59 |
| 0,6 | 0,94 | 0,88 | 0,83 | 0,795 | 0,76 | 0,73 | 0,70 | 0,68 | 0,67 |
| 0,65 | 0,945 | 0,89 | 0,855 | 0,83 | 0,795 | 0,77 | 0,75 | 0,72 | 0,715 |

т. е. на второй стадии, без складкодержателя, происходит меньшая часть деформации. Однако свободное перемещение края заготовки в достаточно высоком конусе матрицы при определенных соотношениях может привести к складкообразованию. Поэтому границы применимости схемы вытяжки на конической матрице необходимо учитывать при определении минимального коэффициента вытяжки с использованием одного из условий устойчивости заготовки против образования складок на второй стадии, например, по формуле (38):

$$m_{d_1} \geq \frac{\sqrt{(20s_D)^2 (1 - \sin \alpha) + \sin^2 \alpha} - 20s_D}{\sin \alpha} \quad (44)$$

В этом случае угол α принимается с учетом оптимальных условий в зоне утонения. Результаты расчетов по формуле (44) представлены в виде номограммы (рис. 18).

Устойчивость края заготовки на второй стадии в конической матрице с плоским складкодержателем увеличивается еще и потому, что в конце первой стадии он отгибается по весьма малому радиусу входной кромки матрицы и на некотором пути сохраняет полученную кривизну в меридиональном сечении (см. рис. 17, б).

На такой матрице возможности первого перехода вытяжки и комбинированной вытяжки ограничиваются относительными толщинами $s_D = 0,7 \div 1,5\%$.

Для вытяжки без складкодержателя Л. А. Шофман предложил коническую матрицу с параметрами [41]: диаметр входной кромки $D_K = (0,9 \div 0,95) D_0$ и угол $\alpha = 30^\circ$. Такая матрица по сравнению с радиальной обеспечивает снижение напряжения в критический момент, но при этом вторая стадия начинается при диаметре края $D \approx 0,71 D_0 \sqrt{1 + m_{d_1}^2}$, и противонапряжение, определяемое по соотношению (43), оказывается большим, чем на матрице с углами, благоприятными для утонения ($\alpha = 10 \div 20^\circ$).

Если же матрица имеет $D_K = (0,9 \div 0,95) D_0$ и $\alpha = 10 \div 20^\circ$, то процесс вытяжки на таких матрицах, имеющих высоту конуса, равную двум и более диаметрам рабочего отверстия, происходит весьма

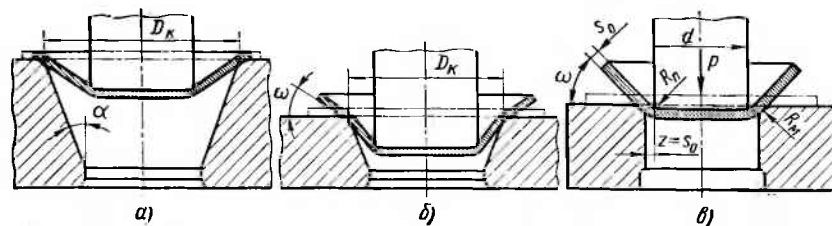
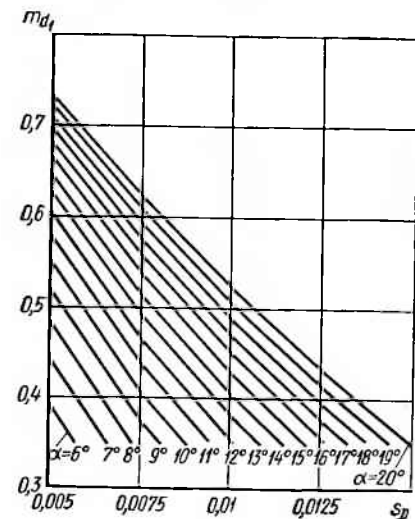


Рис. 19. Влияние входного диаметра матрицы D_K на условия деформации края заготовки:

$a - D_K \approx 0,9 D_0$; $b - D_K \approx 0,70 D_0$; $в$ — схема вытяжки без складкодержателя на матрице с малым радиусом; z — образцы (справа налево) с $s_D = 4,4\%$, деформированные по схемам $a, б, в$



неустойчиво вследствие соскальзывания и перекоса заготовки. Кроме того, применение матрицы большой высоты требует пресов с большой величиной хода и ведет к перерасходу инструментальной стали для штампов.

Со снижением высоты матрицы уменьшается ее входной диаметр D_K , что приводит к затруднению деформации, связанному с уменьшением плеча, по которому происходит прогиб втягиваемой в матрицу заготовки (рис. 19, а, б) при отсутствии складкодержателя.

Эксперименты показали, что при малом значении D_K край заготовки поднимается над плоскостью матрицы на угол ω и заготовка теряет устойчивость, даже если она большой относительной толщины.

На рис. 19, г показаны образцы с $s_D = 4,4\%$, теряющие устойчивость по краю вследствие подъема над матрицей при малом значении D_K . Поэтому схемы вытяжки (рис. 19, б, в) следует считать нерациональными для практического использования (крайний правый образец деформировали на матрице с $D_K \approx 0,9 D_0$).

Потерю устойчивости поднимающегося края заготовки можно предотвратить, если управлять этим подъемом, обеспечив кромке заготовки необходимую опору по наибольшему плечу.

Сочетание требований устойчивости заготовки и благоприятных условий деформирования в рабочем конусе матрицы оказалось возможным в разработанной автором схеме (рис. 20) первой вытяжки на двухконусной матрице, обеспечивающей оптимальное расчленение процесса на стадии [15].

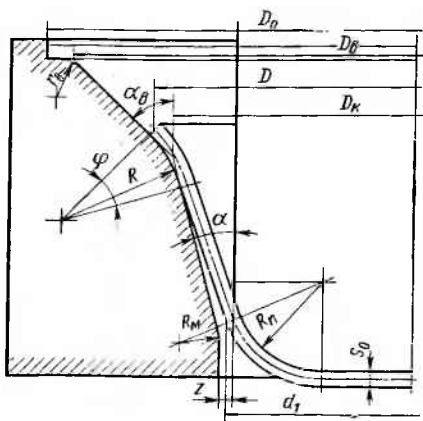


Рис. 20. Схема вытяжки без складкодержателя на двухконусной матрице (конец первой стадии)

Первая стадия вытяжки состоит в деформировании плоской заготовки в верхнем конусе матрицы и втягивании ее в рабочий конус с превращением в коническую чашку, прилегающую к поверхности указанного конуса. При этом поверхность рабочего конуса матрицы и боковая поверхность полуфабриката почти равны.

Вторая стадия состоит во втягивании конусообразной чашки в рабочий поясок матрицы, т. е. практически не отличается от второй стадии вытяжки на одноконусной матрице (см. рис. 17, б).

Оптимальные значения напряжений вытяжки обеспечиваются на первой стадии большим плечом опоры, на второй — достаточно малым углом рабочего конуса матрицы.

Для предотвращения складкообразования и увеличения устойчивости угол верхнего конуса необходимо принимать близким к естественному углу подъема края заготовки и в соответствии с рекомендациями для относительно тонких заготовок, т. е. $\alpha = 30 \div 45^\circ$.

Меняя угол верхнего конуса и радиус перехода между конусами, можно управлять произвольным утонением стенки заготовки на первой стадии, облегчая условия комбинированного процесса на второй стадии.

Границы устойчивости заготовки на этой матрице на основе опытных данных автора характеризуются соотношением, превышающим возможности устойчивости даже на трактриссной матрице:

$$s_D \geq \frac{1 - m_{d_1}}{36} \quad (45)$$

В связи с тем, что вторая стадия вытяжки аналогична второй стадии деформирования на одноконусной матрице, условие оптимального расчленения здесь принимаем по выражению (41), противонапряжение вычисляем по формуле (43).

Сравнивая значения противонапряжения, вычисленные по формулам (27), (36) и (43), приходим к выводу, что наибольшим является противонапряжение на обычной радиальной матрице с малым R_M и прижимом. Минимальное противонапряжение обеспе-

чивают конические матрицы с оптимальным расчленением процесса на стадии. Радиальные матрицы с оптимальным расчленением процесса [условия (35) и (39)] занимают промежуточное положение.

Таким образом, используя различные выражения для $\sigma_{\rho I}$ и подставляя соответствующие параметры инструмента (углы α для конических и $\alpha = \frac{\alpha R}{2}$ для радиальных матриц), можно по общей формуле (32) вычислить максимальное растягивающее напряжение в стенке в начальный критический момент и по формуле (33) — в конечный критический момент первого перехода комбинированной вытяжки при любой геометрии матрицы.

Приравняв максимальное напряжение в стенке, формулы (32) или (33), к максимальному сопротивлению материала деформированию и решая полученное уравнение относительно коэффициентов деформации, можно получить соотношения для их предельных значений в зависимости от параметров вытяжки.

Предельный коэффициент утонения при комбинированной вытяжке в начальный критический момент

$$m_{s_{1\text{пред}}} = - \exp \left\{ \frac{\sin \alpha + \mu_M (1 - \bar{\sigma}_{\rho I})}{\mu_M + \mu_{\Pi}} \right\} - \sqrt{\frac{\left[\frac{\sin \alpha + \mu_M (1 - \bar{\sigma}_{\rho I})}{\mu_M + \mu_{\Pi}} \right]^2 - 2 \left(\frac{0,87}{1 - \psi_P} - \bar{\sigma}_{\rho I} \right) - \sin \alpha \left| \sin \alpha \right|}{\mu_M + \mu_{\Pi}}} \quad (46)$$

где

$$\bar{\sigma}_{\rho I} = \frac{\sigma_{\rho I}}{1,15 \sigma_{sII}}$$

На рис. 21, где представлены результаты расчетов по формуле (46) для конических матриц, видно, что предельный коэффициент утонения тем

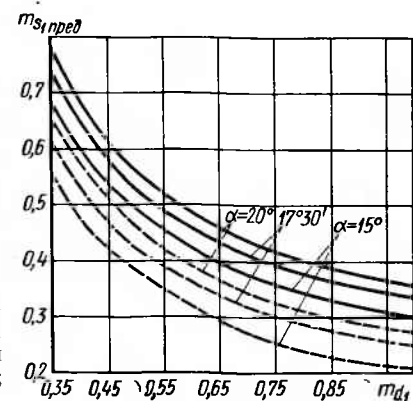


Рис. 21. Теоретический график зависимости предельного коэффициента утонения от коэффициента вытяжки ($\mu_M = 0,05$; $\mu_{\Pi} = 0,1$); — $\psi_P = 0,2$; - - - $\psi_P = 0,3$

меньше, чем больше интенсивность упрочнения, коэффициент вытяжки (чем меньше противонапряжение), коэффициент трения на пуансоне и чем меньше коэффициент трения на матрице и ее угол.

По формуле (46) и кривым рис. 21 можно определить также предельный коэффициент утонения в конечный критический момент комбинированной вытяжки, если известно значение коэффициента вытяжки, соответствующее этому моменту. Обработка опытных данных позволяет предложить приближенную формулу коэффициента вытяжки в конечный критический момент:

$$m_{d1кр} \approx \frac{d_1}{0,8D_0} = 1,25m_{d1}. \quad (47)$$

При $\sigma_{\rho 1} = 0$ из формулы (33) или из формулы (46) можно найти предельный коэффициент утонения при протяжке (края):

$$m_{s_{п. пред}} = - \exp \left[\frac{\sin \alpha + \mu_m}{\mu_{п} + \mu_m} - \sqrt{\left(\frac{\sin \alpha + \mu_m}{\mu_m + \mu_{п}} \right)^2 - \frac{\left(\frac{1,75}{1 - \psi_p} - \sin \alpha \right) \sin \alpha}{\mu_m + \mu_{п}}} \right]. \quad (48)$$

При выполнении анализа процесса в зоне утонения было принято, что скругление на переходе конуса в рабочий поясок отсутствует. Эксперименты автора, проведенные с тщательным измерением параметров процесса, показывают, что более благоприятной геометрией матрицы в указанном месте является минимальный радиус скругления. При значительных радиусах ($R_m \approx 15 s_0$) наблюдалось повышение усилия комбинированной вытяжки как на первом, так и на последующем переходах, процесс становился неустойчивым, требовалось снизить утонение.

Указанные неблагоприятные явления можно объяснить тем, что закругление кромки рабочего пояска конической матрицы, выходящее за пределы зоны утонения, увеличивает противонапряжение в результате дополнительного изгиба со всеми вытекающими из этого последствиями. Это согласуется с данными других исследователей относительно конических матриц для протяжки и с данными о влиянии радиусов скругления матриц на удельные давления протяжки [41].

На рис. 22 показаны графики усилие — путь, полученные на матрицах с различной геометрией перехода конуса в рабочий поясок. Резкий переход в этом месте также, по-видимому, нежелателен, так как он может явиться концентратором напряжений, уменьшить прочность матрицы и ухудшить условия трения на контактной поверхности. Увеличение радиуса R_m на

конической матрице кроме указанных недостатков приводит еще к увеличению высоты матрицы, а матрица с боль-

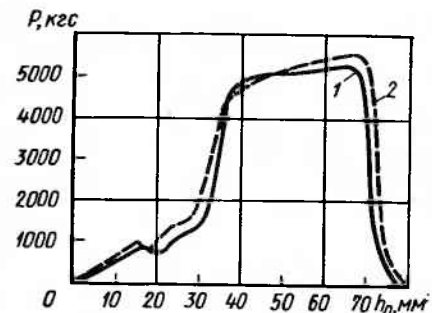


Рис. 22. Зависимость усилия комбинированной вытяжки от геометрии вытяжной кромки конической матрицы. Материал — латунь Л63: $m_{d1} = 0,56$; $m_{s1} = 0,7$; $1 - R_m = 0$; $2 - R_m = 15 s_0$; $s_0 = 1$ мм

шим радиусом приобретает свойства радиальной матрицы, недостатки которой были отмечены выше.

Исходя из этого максимально допустимый радиус скругления рабочего пояска конической матрицы для комбинированной вытяжки может быть вычислен по формуле

$$R_m \leq \frac{s_0 (\cos \alpha - m_{s1})}{1 - \cos \alpha}. \quad (49)$$

При использовании конических матриц с оптимальным расчленением на стадии для вытяжки ($z > s_0$) оптимальные значения радиуса скругления в месте перехода конуса в рабочий поясок, исходя из минимума работы деформации в этом месте, можно определить по формуле [9]

$$R_m \approx \frac{0,71 \sqrt{s_0 d_1}}{\sin \alpha}. \quad (50)$$

Если по каким-то причинам радиус кромки матрицы меньше вычисленного по формуле (50), оптимальные условия деформации на этой кромке (минимальные удельные усилия) будут при вытяжном зазоре

$$\frac{z}{s_0} > \frac{0,71 \sqrt{s_0 d_1}}{s_0} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \operatorname{csc}^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (51)$$

На конических матрицах с оптимальным расчленением процесса максимальные растягивающие напряжения вытяжки возникают на первой стадии. Их можно найти по формулам, получаемым на основе решения приближенных уравнений равновесия с энергетическим условием пластичности. На одноконусной матрице с плоским складкодержателем напряжение найдем по формуле

$$\sigma_{\rho \max} = 1,1 \sigma_{s1} \left[\frac{\left(\ln \frac{1}{m'_{d1}} - \psi + \frac{s_0}{2R_{bc} \sqrt{m'_{d1}}} \right) (1 + \mu_m \varphi_k)}{1 - \frac{0,2 \mu_m (1 + \mu_m \varphi_k)}{m_{d1}} \left(1 - \frac{18 s_D}{1 - m_{d1}} \right)} + \ln \frac{1}{m'_{d1}} \right], \quad (52)$$

где ψ — степень деформации края заготовки, соответствующая максимальному растягивающему напряжению во фланце [32]; $\psi = 1 - \frac{D}{D_0} \approx \psi_p \ln \frac{1}{m_{d_1}}$, φ_k — угол охвата входной кромки конуса матрицы заготовкой; $\varphi_k = 90 - \alpha$; R_b — радиус входной кромки конуса.

На двухконусной матрице без складкодержателя напряжение

$$\sigma_{p_{\max}} = 1,1\sigma_{s1} \left\{ \left[(1 + \mu_m \operatorname{ctg} \alpha_b) \left(\ln \frac{1}{m_{d_1}} - \psi \right) + \frac{s_0}{2R \sqrt{m_{d_1}}} \right] \times \right. \\ \left. \times (1 + \mu_m \varphi_k) + \ln \frac{1}{m_{d_1}} \right\}, \quad (53)$$

где

$$R \approx \frac{D_0 - d_1}{3}; \quad \varphi_k \approx \frac{\alpha_b - \alpha}{2}.$$

Во всех случаях использования схемы вытяжки с оптимальным расчленением на стадии среднее значение сопротивления деформированию можно определять по формуле

$$\sigma_{s1} \approx \frac{\sigma_b}{1 - \psi_p} \left(\frac{1 - m_{d_1}}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}}. \quad (54)$$

Таким образом, схемы первого перехода на основе оптимального расчленения процесса на характерные стадии создают предпосылки для интенсификации технологии вытяжки и комбинированной вытяжки.

Для достижения максимальной степени вытяжки на операции необходима максимальная степень на первой стадии. Предельный коэффициент вытяжки на первой стадии определяется по условию прочности опасного сечения:

$$\sigma_{p_{\max}} \leq 1,1\sigma_b \frac{R_{ns}}{R_{ns} + 0,5}. \quad (55)$$

Решая полученное уравнение, находим

$$m'_{d_{1\text{пред}}} = -\exp \left[\frac{\frac{R_{ns}}{R_{ns} + 0,5} - 0,7s_0}{2 + \mu_m (90 - \alpha)} \right]^{1 - \psi_p}. \quad (56)$$

На основе предельной деформации на первой стадии, исходя из соотношений между параметрами матрицы, можно определить предельный коэффициент первого перехода вытяжки с учетом трения, упрочнения, параметров матрицы и пуансона:

$$m_{d_{1\text{пред}}} = \sqrt{\frac{(m'_{d_{1\text{пред}}})^2 - \sin \alpha}{1 - \sin \alpha}}. \quad (57)$$

Теоретический коэффициент вытяжки на первой стадии для упрочняющегося материала

$$m'_{d_{1r}} = -\exp 0,5^{1 - \psi_p},$$

а без учета упрочнения

$$m'_{d_{1r}} = e^{-0,5},$$

откуда при благоприятных углах ($\alpha \approx 15^\circ$) матрицы значение теоретического коэффициента первого перехода вытяжки получается

$$m_{d_{1r}} \approx \frac{1}{e} \approx 0,37.$$

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРВОГО ПЕРЕХОДА КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫТЯЖКИ НА РАЗЛИЧНЫХ МАТРИЦАХ

Радиальные матрицы с большим противонапряжением. Условия проведения экспериментов на радиальных матрицах были следующие. Вытяжку проводили на штампе с жестким складкодержателем, обеспечивающим начальный зазор между матрицей и его рабочей поверхностью около $1,05 s_0$. Радиус закругления матрицы был принят несколько более жестким, чем рекомендуемые, а именно $R_m = (3 \div 4) s_0$. Величину вытяжного зазора изменяли путем смены матриц при постоянном пуансоне диаметром $d_n = 33$ мм, в диапазоне значений $\frac{z}{s_0} = 1,35 \div 0,6$. Опыты

проводили на гидравлическом испытательном прессе с записью диаграмм усилие — путь.

Испытанию подвергали два материала: сталь 08ВГ толщиной 1,35 мм и латунь Л63 толщиной 1,5 мм.

На рис. 23 показаны кривые усилие — путь, снятые при проведении экспериментов, на рис. 24 — кривые зависимости максимальных усилий от зазора, построенные по данным экспериментов. Характер кривых подобен кривым, представленным в работах [47, 41]. Видно, что с уменьшением зазора усилие вытяжки возрастает на 30—40%. Однако получаемые при этом повышение точности изделий и увеличение относительной глубины свидетельствуют о том, что комбинированная вытяжка даже при таких нерациональных условиях деформации эффективна.

Одноконусные матрицы без складкодержателя. Для выявления максимальных степеней деформации комбинированной вытяжки и допустимых коэффициентов утонения на конических матрицах без складкодержателя была проведена большая серия экспериментов и производственных испытаний с заготовками из

Таблица 6

Параметры первого перехода комбинированной вытяжки толстых заготовок

| Материал и размер заготовки | ε_D | m_{d_1} | m_{s_1} | $\psi_k, \%$ | Условия вытяжки | Результаты вытяжки |
|--|-----------------|-----------|----------------------------|--------------|----------------------------|-------------------------------|
| Латунь Л68 $D_0=46$ мм $s_0=6,1$ мм | 0,13 | 0,51 | 0,55 | 72,0 | Вытяжка через две матрицы | 100% заготовок без разрушения |
| | | 0,52 | 0,50 | 74,0 | | То же |
| | | 0,52 | 0,45 | 76,4 | | » |
| | | 0,53 | 0,40 | 78,8 | | » |
| | | 0,54 | 0,35 | 81,1 | | 20% разрушенных заготовок |
| 0,55 | 0,30 | 83,6 | 100% разрушенных заготовок | | | |
| Латунь Л68 $D_0=55$ мм $s_0=4,5$ мм | 0,08 | 0,52 | 0,60 | 68,6 | Вытяжка через одну матрицу | 100% заготовок без разрушения |
| | | 0,52 | 0,55 | 71,4 | | То же |
| | | 0,53 | 0,50 | 73,6 | | » |
| | | 0,53 | 0,45 | 76,2 | | » |
| | | 0,54 | 0,40 | 78,4 | | » |
| 0,54 | 0,35 | 81,1 | 20% разрушенных заготовок | | | |
| 0,55 | 0,30 | 83,5 | 100% разрушенных заготовок | | | |
| Сталь 10 $D_0=32$ мм $s_0=2,7$ мм | 0,09 | 0,48 | 0,67 | 68,0 | Вытяжка через одну матрицу | 100% заготовок без разрушения |
| | | 0,50 | 0,67 | 67,0 | | То же |
| | | 0,53 | 0,50 | 73,0 | | » |
| 0,55 | 0,33 | 81,5 | 100% разрушенных заготовок | | | |
| Сплав АМцА-М $D_0=100$ мм $s_0=4,5$ мм | 0,045—0,05 | 0,57 | 0,70 | 60,0 | Вытяжка через одну матрицу | 100% заготовок без разрушения |
| | | 0,54 | 0,70 | 62,0 | | То же |
| | | 0,52 | 0,70 | 63,6 | | » |
| | | 0,51 | 0,70 | 64,0 | | » |
| | | 0,52 | 0,60 | 68,6 | | » |
| | | 0,58 | 0,50 | 71,0 | | » |
| 0,56 | 0,50 | 72,0 | » | | | |
| 0,53 | 0,50 | 73,6 | 100% разрушенных заготовок | | | |
| Никель Н1 $D_0=50$ мм $s_0=5$ мм | 0,09 | 0,54 | 0,44 | 76 | Вытяжка через одну матрицу | 100% заготовок без разрушения |

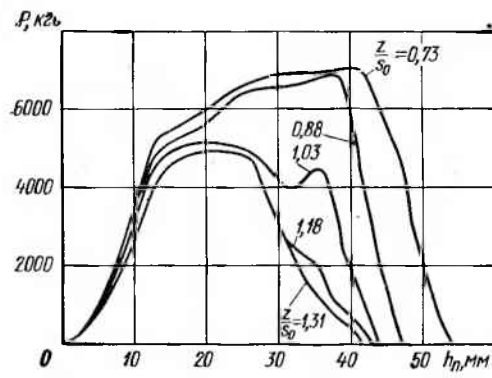


Рис. 23. Графики усилие — путь вытяжки на радиальной матрице со складкодержателем при $m_{d_1}=0,51$ и различных относительных зазорах $\frac{z}{s_0}$. Материал — сталь 08кп; $s_0=1,35$ мм

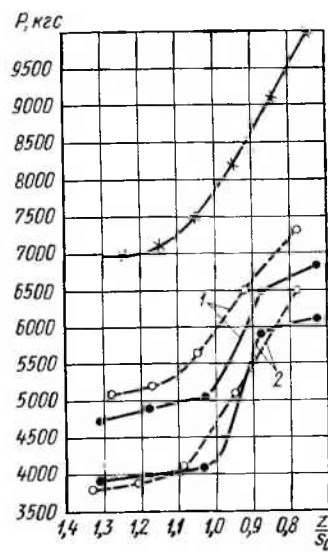


Рис. 24. Графики зависимости максимального усилия вытяжки от величины вытяжного зазора $\frac{z}{s_0}$:

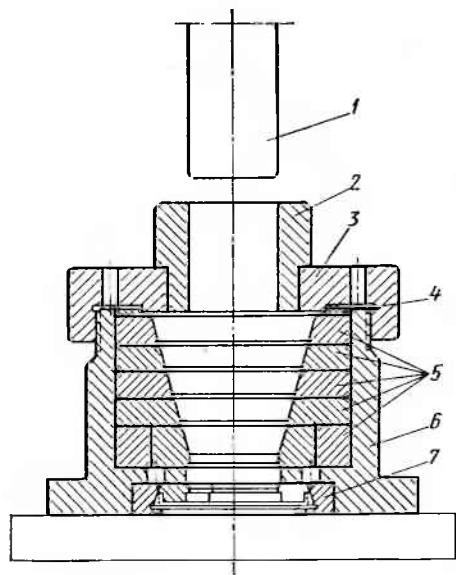
x — x латунь Л63 по данным работы [51];
o — o латунь Л63; } по данным
● — ● сталь 08кп. } автора книги
1 — $m_{d_1} = 0,51$; 2 — $m_{d_1} = 0,57$

различных материалов при относительной толщине $s_D=4,5 \div 13\%$. Получены показатели деформации, значительно расширяющие представления о возможностях комбинированной вытяжки. Результаты экспериментов приведены в табл. 6 [11].

Одноконусные матрицы с плоским складкодержателем. Для проверки новой схемы автором были проведены экспериментальные исследования вытяжки без утонения и комбинированной вытяжки на конических матрицах с плоским складкодержателем в штампе, показанном на рис. 25. Оригинальность экспериментального штампа состоит в том, что его матрица имеет составную конструкцию, позволяющую менять два параметра (D_k и h_k) при сохранении других параметров неизменными. Входной диаметр конуса D_k имеет следующие значения: 91; 82; 74; 66; 58 мм, изменяющие условия расчленения процесса на стадии.

Эксперименты проводили на латуни Л80 толщиной $s_0=0,95$ мм. Диаметр заготовки $D_0=100$ мм ($s_D=0,95\%$), рабочий диаметр матрицы $d_m=50$ мм, угол $\alpha=15^\circ$.

Для записи графиков усилие — путь использовали испытательную машину ГМС-50, на которой устанавливали экспериментальный штамп. Для сохранения общей высоты матриц под них подкладывали компенсационные кольца различной толщины.



Складкодержатель штампа был винтовой и позволял создавать условия для вытяжки с жестким складкодержателем. Центриция вытяжного пуансона относительно матрицы обеспечивалась направляющей втулкой, сопрягаемой со складкодержателем. Для осуществления вытяжки с различными зазорами имелся комплект пуансонов различных диаметров.

Рис. 25. Экспериментальный штамп:

1 — пуансон; 2 — центрирующая втулка; 3 — складкодержатель; 4 — фиксатор; 5 — составная матрица; 6 — корпус; 7 — съёмник

Эксперименты показали, что удовлетворительная вытяжка указанных образцов возможна лишь на матрицах с $D_k=58$; 66 и 74 мм. На матрицах с $D_k=91$ и 82 мм образец терял устойчивость после выхода края из-под складкодержателя.

Согласно работе [31], действие складкодержателя можно прекращать лишь при достижении контуром заготовки текущего диаметра $D=0,73 D_0$, при котором давление складкообразования снижается до $Q \approx 0,4 Q_{\max}$.

Так как при вытяжке на матрице с $D_k=0,74$ мм фактически край образца выходит из-под складкодержателя (с учетом закругления кромки $R_b=5$) раньше, т. е. при $D \approx (0,79 \div 0,80) D_0$, то потеря устойчивости происходит при малейшем дефекте кромки.

На матрице с $D_k=58$ мм вытяжка шла с большим произвольным утонением стенки, что иногда приводило к отрыву дна в момент втягивания заготовки в рабочий пояс матрицы вследствие сложения растягивающих напряжений первой и второй стадий деформирования, т. е. большого противонапряжения.

Наиболее устойчиво происходила вытяжка на матрице с $D_k=66$ мм. Расчетное (оптимальное) значение входного диаметра матрицы, найденное по формуле (42), также дает значение $D_{k, \text{расч}}=66$ мм.

Анализ результатов экспериментов и графиков усилие — путь вытяжки и комбинированной вытяжки (рис. 26, а, б, в) показывает следующее:

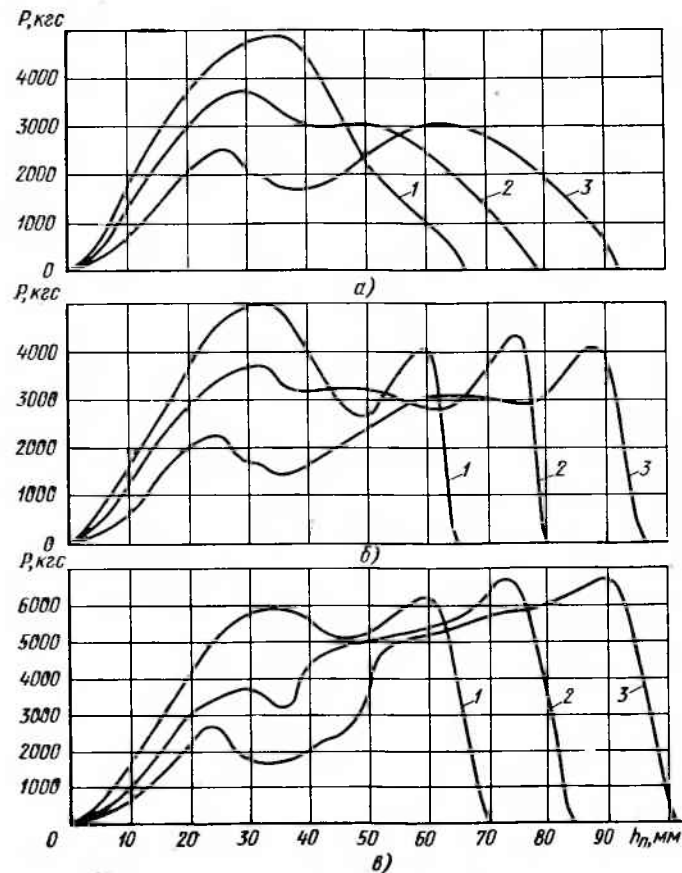


Рис. 26. Результаты вытяжки на конической матрице со складкодержателем:

а, б, в — графики усилие—путь вытяжки соответственно при $\frac{z}{s_0} = 1,4; 1,05; 0,737$;
1 — $D_k=58$ мм; 2 — $D_k=66$ мм; 3 — $D_k=74$ мм. Материал — латунь Л80; $m_{d_1} \approx 0,49$

1. На матрицах с $D_k \geq D_{k, \text{расч}}$ четко видно расчленение процесса на две стадии.

2. На первой стадии усилие больше при меньшем D_k (т. е. при меньшем m'_{d_1}).

3. С уменьшением D_k при комбинированной вытяжке несколько уменьшается максимальное усилие второй стадии и общая работа деформации (по-видимому, под влиянием большего произвольного утонения стенки на первой стадии).

4. Для обеспечения оптимальных условий вытяжки тонколистовых заготовок (с $s_D \geq 0,8\%$) на конических матрицах с плоским складкодержателем входной диаметр конуса следует принимать в соответствии с расчетной формулой (42). Увеличение его (по сравнению с расчетным) приводит к складкообразованию, уменьшение — к отрыву дна.

В табл. 7 приведены результаты производственных испытаний комбинированной вытяжки заготовок из различных материалов с $s_D = 0,4 \div 1,1\%$ на конических матрицах с плоским складкодержателем.

Таблица 7

Параметры первого перехода комбинированной вытяжки тонколистовых заготовок

| Материал и размеры заготовки | $s_D, \%$ | Параметры вытяжки | | |
|--|-----------|-------------------|-----------|--------------|
| | | m_{d_1} | m_{s_1} | $\psi_k, \%$ |
| Сталь 08кп $D_0=200$ мм $s_0=0,93$ мм | 0,46 | 0,56 | 0,64 | 64,0 |
| | | 0,56 | 0,59 | 67,0 |
| | | 0,56 | 0,54 | 70,0 |
| | | | | |
| Сталь 08кп $D_0=210$ мм $s_0=0,85$ мм | 0,40 | 0,53 | 0,65 | 66,0 |
| | | | | |
| Латунь Л80 $D_0=90$ мм $s_0=0,95$ мм | 1,05 | 0,59 | 0,58 | 66,0 |
| | | 0,56 | 0,58 | 67,5 |
| | | 0,54 | 0,58 | 68,5 |
| | | 0,52 | 0,74 | 61,5 |
| Латунь Л80 $D_0=100$ мм $s_0=0,95$ мм | 0,95 | 0,49 | 0,47 | 77,0 |
| | | | | |
| Латунь Л80 $D_0=110$ мм $s_0=0,95$ мм | 0,86 | 0,58 | 0,58 | 66,5 |
| | | 0,56 | 0,58 | 67,5 |
| | | 0,53 | 0,58 | 69,2 |
| | | 0,51 | 0,74 | 62,5 |
| Сталь X18H10T $D_0=90$ мм $s_0=1,05$ мм | 1,16 | 0,59 | 0,52 | 69,5 |
| | | 0,56 | 0,52 | 71,0 |
| | | 0,54 | 0,52 | 72,0 |
| | | 0,52 | 0,67 | 65,0 |
| Сталь X18H10T $D_0=110$ мм $s_0=1,05$ мм | 0,95 | 0,58 | 0,52 | 70,0 |
| | | 0,56 | 0,52 | 71,0 |
| | | 0,53 | 0,52 | 72,5 |
| | | 0,51 | 0,67 | 66,0 |

Снижение максимального усилия первой стадии вытяжки (без утонения) с увеличением D_k дает основание предсказывать увеличение степени вытяжки на штампах с расчетными параметрами по сравнению с обычными.

Экспериментальную проверку этой гипотезы проводили на том же штампе с составной матрицей при вытяжке латуни Л63 толщиной $s_0 = 1,5$ мм. Результаты опытов представлены в табл. 8.

Таблица 8

Зависимость основных параметров вытяжки со складкодержателем от величины входного диаметра рабочего конуса матрицы D_k (латунь Л63, $s_0 = 1,5$ мм)

| $D_k, \text{мм}$ | $s_D, \%$ | Параметры вытяжки | | $D_k, \text{мм}$ | $s_D, \%$ | Параметры вытяжки | |
|------------------|-----------|-------------------|-------|------------------|-----------|-------------------|-------|
| | | m_{d_1} | H_d | | | m_{d_1} | H_d |
| 74 | 1,5 | 0,476 | 0,845 | 91 | 1,22 | 0,392 | 1,42 |
| 82 | 1,36 | 0,438 | 1,04 | | | | |
| | 1,3 | 0,418 | 1,16 | | | | |
| | 1,3 | 0,406 | 1,22 | | | | |
| | 1,25 | 0,4 | 1,31 | | | | |

На рис. 27 показаны для сравнения стаканы, полученные с минимальным коэффициентом вытяжки $m_{d_1} = 0,467$ (рис. 27, а), рекомендуемым в справочнике [34], и минимальным коэффициентом $m_{d_1} = 0,385$ (рис. 27, б), полученным в штампе с конической матрицей и плоским складкодержателем.

Таким образом, эксперименты подтвердили, что в штампе с конической матрицей ($D_k \geq 0,66 D_0$) и плоским складкодержателем

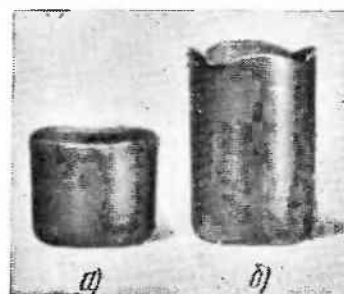


Рис. 27. Образцы после вытяжки без утонения:

а — на радиальной матрице с $m_{d_1} = 0,467$; $H_d = 0,84$; б — на конической матрице с расчетной геометрией со складкодержателем с $m_{d_1} = 0,385$; $H_d = 1,5$ Материал — латунь Л63; $s_0 = 1,5$ мм; $z \approx 1,1 s_0$

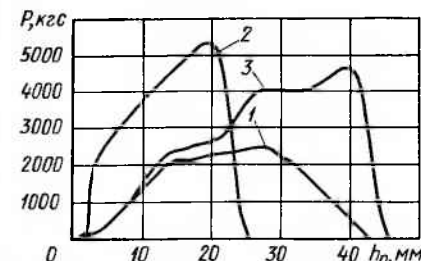


Рис. 28. Кривые усилия — путь трех различных процессов вытяжки:

1 — вытяжка стакана; 2 — протяжка того же стакана; 3 — комбинированная вытяжка. Материал — сталь 08кп; $m_{d_1} = 0,57$; $m_{s_1} = 0,88$

теlem можно вытягивать заготовки с $s_D = (0,8 \div 1,5) \%$ при $m_{d_1} = 0,4 \div 0,5$.

В дальнейшем на таком штампе с расчетной матрицей были проведены сравнительные эксперименты по вытяжке, комбинированной вытяжке и протяжке. Кривые усилие — путь, полученные при этих экспериментах (рис. 28), показывают, что усилие комбинированной вытяжки несколько меньше, чем усилие протяжки при прочих равных условиях.

Двухконусные матрицы. Экспериментальную проверку схемы вытяжки на двухконусной матрице производили с использованием различных материалов. Вытяжку без складкодержателя успешно выполняли в диапазоне относительных толщин заготовок $1\% < s_D < 2\%$. Но и заготовки с относительной толщиной больше 2% на таких матрицах можно вытягивать с большими степенями деформации, чем на одноконусных матрицах, так как начальные условия деформирования здесь более надежны, заготовка не соскальзывает, изделие получается с более ровным краем (уменьшается косина).

Благоприятные условия, создаваемые для вытяжки двухконусными матрицами, подтверждаются результатами, приведенными в табл. 9.

Таблица 9

Технологические параметры вытяжки на двухконусной матрице без складкодержателя

| Материал заготовки | $D_0 \times s_0$, мм | s_D , % | m_{d_1} | m_{s_1} | ψ , % | $\frac{D_0 - d_1}{s_0}$ |
|--------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------------------|
| Латунь Л63 | 120 × 1,5 | 1,25 | 0,373 | 1 | 62,7 | 51 |
| | 120 × 1,55 | 1,29 | 0,405 | 1 | 59,5 | 46 |
| АМцА-М | 110 × 1,7 | 1,55 | 0,443 | 0,78 | 65,5 | 36 |
| | 110 × 1,7 | 1,55 | 0,44 | 1 | 56 | 36,5 |
| | 110 × 1,7 | 1,55 | 0,425 | 1 | 57,5 | 37 |
| | 110 × 1,7 | 1,55 | 0,407 | 1 | 59,3 | 38,2 |
| | 110 × 1,7 | 1,55 | 0,38 | 1 | 62 | 40 |

Для параметров заготовок, указанных в табл. 9, рекомендуются коэффициенты вытяжки на конических матрицах $m_{d_1} = 0,56 \div 0,65$ [23, 34]. Результаты автора данной книги дают основание рекомендовать вытяжку без складкодержателя на двухконусных матрицах с $m_{d_1} = 0,42 \div 0,45$, т. е. с увеличенным степеню вытяжки на 25—35%.

Анализ рис. 29 показывает, что максимальное усилие комбинированной вытяжки на разных матрицах почти не меняется (так как зависит от постоянного для указанных матриц параметра $\alpha = 15^\circ$), т. е. практически не зависит от геометрии заходной части матрицы. Усилие и характер кривой на первой стадии в значительной степени зависят от геометрии заходной части.

Рис. 29. Кривые усилие — путь комбинированной вытяжки на различных матрицах:

1 — вытяжка на одноконусной расчетной матрице со складкодержателем ($\alpha = 15^\circ$); 2, 3 — вытяжка на двухконусной матрице без складкодержателя (с $\alpha_D = 45$ и 30° соответственно, $\alpha = 15^\circ$); 4 — вытяжка на одноконусной (высокой) матрице с $\alpha = 15^\circ$ и $D_K = 0,90 D_0$. Материал — сплав АМцА-М; $s_0 = 1,7$ мм; $m_{d_1} = 0,535$; $m_{s_1} = 0,59$

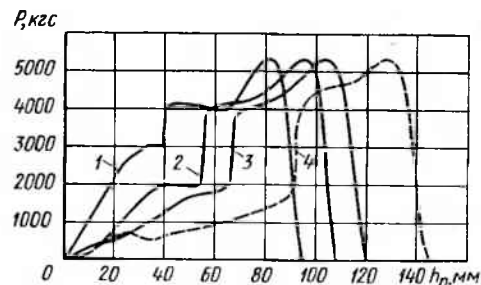


Схема вытяжки на двухконусном профиле возможна и с коническим складкодержателем в пределах первой стадии вытяжки. При соблюдении принципа оптимального расчленения процесса на стадии открываются новые возможности использования приема, описанного М. А. Платоновым. Вначале плоская заготовка деформируется трубчатым коническим пуансоном на верхнем конусе матрицы, затем цилиндрическим пуансоном, центрируемым в коническом, производится втягивание заготовки в рабочий конус, имеющий расчетную геометрию. При этом остановившийся конический пуансон (закрепленный, например, на наружном ползуне прессы) используется в качестве складкодержателя.

5. ПЕРВЫЙ ПЕРЕХОД ВЫТЯЖКИ КОРОВЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ ПО НОВОМУ МЕТОДУ

Вопросы теории вытяжки коробчатых деталей значительно сложнее, чем вопросы вытяжки осесимметричных деталей. Нет пока единых теоретически обоснованных рекомендаций по расчету технологии вытяжки коробчатых деталей.

В мелкосерийном производстве такие детали в основном изготавливают гибкой из листа с последующей сваркой, пайкой или закаткой. В крупносерийном и массовом производстве большое распространение получила также глубокая вытяжка. В литературе описан лишь метод вытяжки коробчатых деталей без принудительного утонения стенок [5, 25, 34, 43]. Сложная многооперационная технология вытяжки без утонения коробчатых изделий не обеспечивает их высокого качества. Основными видами брака являются [25]: расслоение и другие дефекты исходного материала; складки на стенках вытянутых изделий; царапины, задиры из-за налипания частиц металла на рабочие поверхности штампов; выпуклость дна; следы от предыдущей вытяжки при наличии скосов у дна.

Кроме того, возникает значительная разница в толщине стенки у дна и у края (в результате произвольного утонения при вытяжке), а также кривизна стенок («хлопуны»).

Все эти недостатки технологии вытяжки коробчатых деталей, а также сложность изготовления и отладки большого числа вытяжных штампов на каждую деталь создают значительные трудности в производстве.

Сущность нового метода вытяжки коробчатых деталей. Основная сложность теоретического анализа вытяжки коробчатых деталей заключается в неравномерности распределения деформаций по контуру с самого начала процесса. Разрушение заготовки, как правило, происходит в наиболее напряженных местах опасного сечения у дна — в углах.

В основу разработанного автором метода вытяжки положен описанный выше принцип оптимального расчленения процесса на стадии с целью обеспечения максимальной равномерности распределения деформации по контуру вытягиваемой заготовки на первой стадии вытяжки и опережающая деформация наиболее сложных участков контура для уменьшения неравномерности деформации на второй стадии, когда происходит оформление контура изделия в вытяжном зазоре.

Заготовка должна иметь плавный оптимальный контур (круг — для квадратной, эллипс или овал — для прямоугольной или эллиптической детали).

При однооперационном процессе плоской заготовке в начальной стадии вытяжки придается форма конусообразной чашки с дном по форме будущей детали, т. е. реализуются условия оптимального расчленения процесса на стадии. В случае, если деталь имеет форму квадратной коробки, это будет круглая чашка в виде усеченного конуса с квадратным дном, в случае, если деталь прямоугольная — эллиптическая (овальная) с прямоугольным дном. Такие промежуточные формы заготовки определяют равномерное распределение деформаций по контуру под действием тангенциальных напряжений сжатия и радиально-осевых напряжений растяжения.

На второй стадии процесса вытяжки, при втягивании конусообразной чашки в рабочее отверстие матрицы, имеющее контур изделия, производится опережающая деформация наиболее сложных участков контура изделия, т. е. участков с большей кривизной. При этом деформация на участках контура с малой кривизной (в частности на прямых сторонах коробки) отстает по ходу пуансона.

Вследствие того, что в начале второй стадии участки заготовки, соответствующие прямым сторонам (или участкам малой кривизны) будущей детали, еще мало упрочнены, «излишки» материала из угловых участков легко вытесняются в направлении середины прямых сторон, что облегчает деформацию в углах.

После того, как очаг деформации на угловых участках удалится от опасного сечения на достаточное расстояние и опасное сечение (у дна) разгрузится за счет увеличивающегося полез-

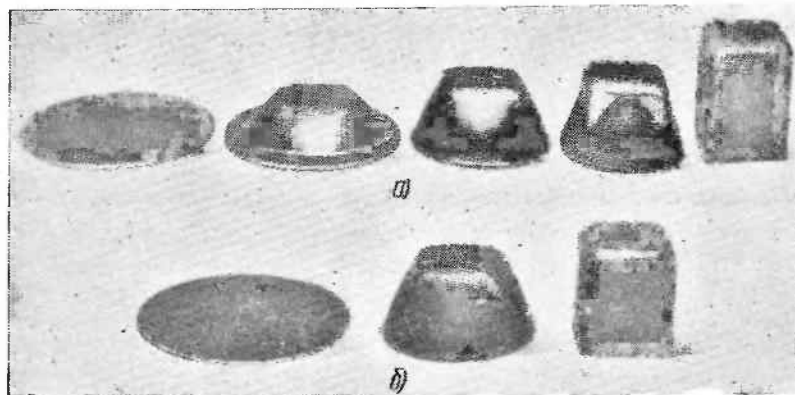


Рис. 30. Последовательность вытяжки коробчатых деталей (по стадиям): а — со складкодержателем; материал — латунь Л63; $D_0=66$ мм; $s_0=1$ мм; б — без складкодержателя на двухконусной матрице; материал — сталь 08кп; $D_0=60$ мм; $s_0=1,35$ мм; $B=23$ мм

ного трения в углах между пуансоном и стенкой изделия, вступают в вытяжной зазор участки заготовки на прямых сторонах контура. А так как на этих участках деформация значительно меньше, опасность разрыва заготовки снижается.

На рис. 30 показана последовательность превращения круглой заготовки в квадратное изделие по описываемому методу со складкодержателем и без складкодержателя. Очевидно, что этим методом можно получить изделия значительной относительной глубины за первый переход.

Такая последовательность деформирования заготовки увеличивает ее устойчивость (конический фланец с отогнутой кромкой более устойчив, чем плоский) против складкообразования; более равномерно распределяются деформации по контуру заготовки, так как появляется возможность свободного вытеснения материала из участков контура с большой кривизной в участки с малой кривизной, деформируемые позже.

Вообще степень вытеснения материала из угловых закруглений в боковые стенки характеризуется совершенством процесса вытяжки коробчатых деталей, так как от нее зависит разгрузка наиболее напряженных участков. Однако существующие методы вытяжки таких деталей имеют весьма ограниченные возможности для перераспределения материала.

Так как чаще всего разрыв вытягиваемой заготовки происходит в углах, то вытеснение материала из углов уменьшает нагрузку на опасное сечение, позволяя увеличивать достижимые степени вытяжки.

Принцип расчленения деформации заготовки по ходу пуансона и по контуру, использованный в данном методе, открывает

новые возможности не только для вытяжки коробчатых изделий без утонения стенок, но и для комбинированной вытяжки.

Осуществить комбинированную вытяжку коробчатых изделий на основе существующих методов было невозможно из-за значительного противонапряжения от зоны I и неравномерности поля напряжений.

Актуальность комбинированной вытяжки коробчатых деталей обосновывается, во-первых, возможностью увеличения относительной глубины вытяжки за один переход, т. е. сокращением технологического цикла изготовления изделий, во-вторых, улучшением их качества.

При деформировании на второй стадии с вытяжным зазором меньше голщины заготовки дополнительно уменьшается неравномерность деформации стенки сложного контура за счет добавления деформаций, нормальных к ее поверхности. Это способствует заглаживанию дефектов исходного материала, следов от предыдущей вытяжки, выравниванию голщины стенки по всей высоте. Кроме того, принудительное утонение, обеспечивая более равномерное распределение деформаций и свойств материала, исключает возможность появления местных выпуклостей прямых стенок («хлопунов»).

Возникновение этого дефекта при вытяжке без утонения можно объяснить тем, что материал прямых стенок коробчатых деталей почти не подвергается пластической деформации в процессе их гибки вокруг ребер у дна. Уже после этого изгиба стенки получают некоторый объем материала, вытесняемого из угловых участков, и испытывают тангенциальное сжатие, что и приводит к местной упругой потере устойчивости стенки. При этом вытяжной зазор, больший, чем толщина материала, не препятствует распространению части деформации на стенки ниже вытяжного ребра матрицы.

Подтверждением приведенного механизма возникновения местных выпуклостей является то, что они чаще встречаются у длинных коробчатых деталей с большим отношением сторон $\frac{A}{B}$ и с малым угловым радиусом r_{γ} , когда значительная часть прямой стенки в пластической деформации вытяжки не участвует.

В отличие от этого новый метод вытяжки коробчатых изделий характеризуется наличием сжато-растянутой схемы нагружения всего объема фланца заготовки с самого начала.

Необходимо заметить, что дефект, называемый «выпуклое дно», тоже в некоторой степени является следствием неравномерного распределения деформаций по контуру заготовки при существующем методе вытяжки, хотя здесь играют определенную роль изгибающие моменты, причем тем большую, чем длиннее деталь.

Вытяжка через две (и более) матрицы обычно применяется при операциях протяжки главным образом на последующих переходах для достижения большей степени утонения. При протяжке через две матрицы принято на верхней матрице назначать большее утонение, чем на нижней, хотя это и ведет к увеличению разностенности [41].

Ввиду того, что при комбинированной вытяжке основное внимание уделяется достижению большей деформации по периметру, общее утонение необходимо распределить между матрицами таким образом, чтобы разгрузить верхнюю матрицу, в которой осуществляется собственно комбинированный процесс. На нижней матрице при этом происходит «чистая» протяжка.

Следовательно, **основной принцип комбинированной вытяжки через две матрицы: на верхней матрице утонение должно быть меньше, чем на нижней.**

Согласно теоретическому анализу [формула (32), (см. рис. 21)], предельные коэффициенты утонения при комбинированной вытяжке больше, чем при протяжке. Следовательно, и рабочие (расчетные) коэффициенты утонения, учитывающие некоторый запас для обеспечения устойчивости процесса, на верхней матрице (комбинированный процесс) необходимо назначать большие, чем на нижней (процесс протяжки). Степень деформации в этом случае на нижней матрице будет меньше, чем на верхней, что согласуется с упрочнением стенки, выходящей из верхней матрицы. Кроме того, такое соотношение коэффициентов утонения частично уменьшает упомянутую опасность увеличения разностенности.

Опыт внедрения комбинированной вытяжки стали, латуни, алюминия и нержавеющей стали по указанному принципу распределения деформации на верхней и нижней матрицах успешно реализуется на первом и последующих переходах.

На рис. 31, а показана заготовка с характерным отрывом дна при чрезмерном нагружении первого перехода комбинированной вытяжки. Вытяжка здесь производилась без складкодержателя с $m_{d1}=0,48$ и $m_{s1}=0,52$ на одной матрице. Коэффициент утонения для низкоуглеродистой стали ($\psi_p \approx 0,2$) здесь близок к предельному ($m_{s_{\text{пред}}} \approx 0,5$, см. рис. 21), а трение по пуансону не достигло достаточной величины, чтобы разгрузить опасное сечение. Коэффициент вытяжки $m_{d1}=0,48$ далек от предельного, так как при прочих равных условиях, но с меньшим утонением производилась вытяжка с $m_{d1}=0,425$. Таким образом, причина разрыва заготовки — чрезмерное утонение.

Из такой же заготовки ($D_0=66$ мм, $s_0=1,5$ мм) была успешно произведена первая вытяжка через две матрицы со

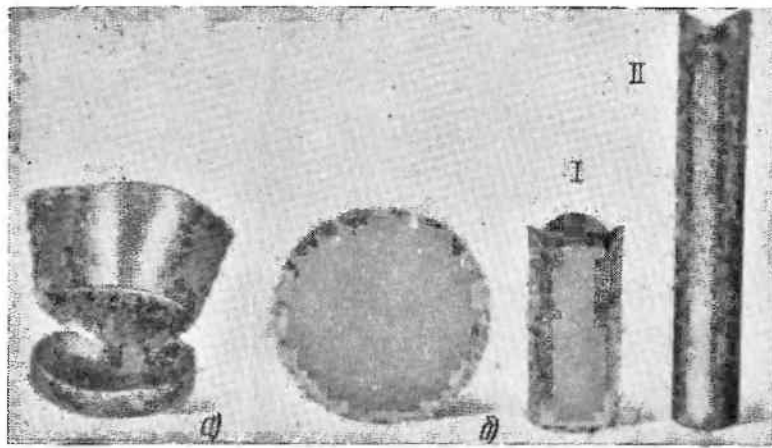


Рис. 31. Первый переход комбинированной вытяжки через две матрицы: а — характерный отрыв дна на верхней матрице при чрезмерном утонении; б — такая же заготовка, успешно вытянутая через две матрицы на первом переходе (I); готовое изделие, полученное на второй вытяжке через две матрицы (II) из заготовки — стакана (б). Материал — сталь Юкп; $s_0=1,5$ мм

следующими коэффициентами: $m_{d_1} = 0,44$; $m_{s_1} = m_{s_1}^b m_{s_1}^n = 0,75 \times 0,67 = 0,5$ ($m_{s_1}^b \approx 0,54$; $m_{s_1}^n \approx 0,35$). На рис. 31, б представлен результат вытяжки через две матрицы по описанной схеме.

Существует два способа выполнения протяжки через две матрицы: параллельный и последовательный. При параллельном деформация протяжки на установившейся стадии происходит в обеих матрицах одновременно и максимальное усилие в этот момент почти равно сумме усилий протяжки на каждой матрице [24, 36]. При последовательном способе деформация в нижней матрице начинается после выхода края полуфабриката из верхней матрицы, и усилие на операции, переходе через нуль, не превышает усилия на одной матрице [19, 24].

Недостатком первого способа является значительная нагрузка на пресс и инструмент, недостатком второго — потеря направления пуансоном, возможность его отклонения от оси в начале деформации в нижней матрице и увеличение разностенности изделий.

Для обеспечения оптимальных силовых условий комбинированной вытяжки и протяжки через две матрицы предложен метод выполнения первого и последующих переходов, основанный на расчетном расстоянии $H_{M. \text{расч}}$ между рабочими поясками матриц. В отличие от параллельного и последовательного этот метод можно назвать совмещенным.

В основу расчета положено основное условие принципа оптимального расчленения процесса на стадии, состоящее в том,

что деформация в нижней матрице начинается на этапе снижения усилия вытяжки в верхней матрице.

Это обеспечивает, с одной стороны, максимальное усилие на операции, не превышающее усилия на одной из матриц, с другой — надежно направление пуансона в верхней матрице, так как край полуфабриката в этот момент еще не вышел из ее рабочего пояска.

На рис. 32, а показан график усилие — путь первого перехода комбинированной вытяжки при параллельном способе, часто применяемом при протяжке. Как указано в литературе [1, 24, 41], расстояние между матрицами в этом случае принимается $H_M = (0,5 \div 0,8) d$.

Из графиков следует, что происходит сложение усилий, увеличивающее максимальное технологическое усилие примерно в 1,5 раза. Опыт показывает, что этот момент является наиболее опасным с точки зрения отрыва дна вытягиваемого изделия.

На рис. 32, б показан график усилие — путь при последовательном способе деформации через две матрицы (с выходом полуфабриката из верхней матрицы), а на рис. 32, в — при комбинированной вытяжке по совмещенному способу, когда

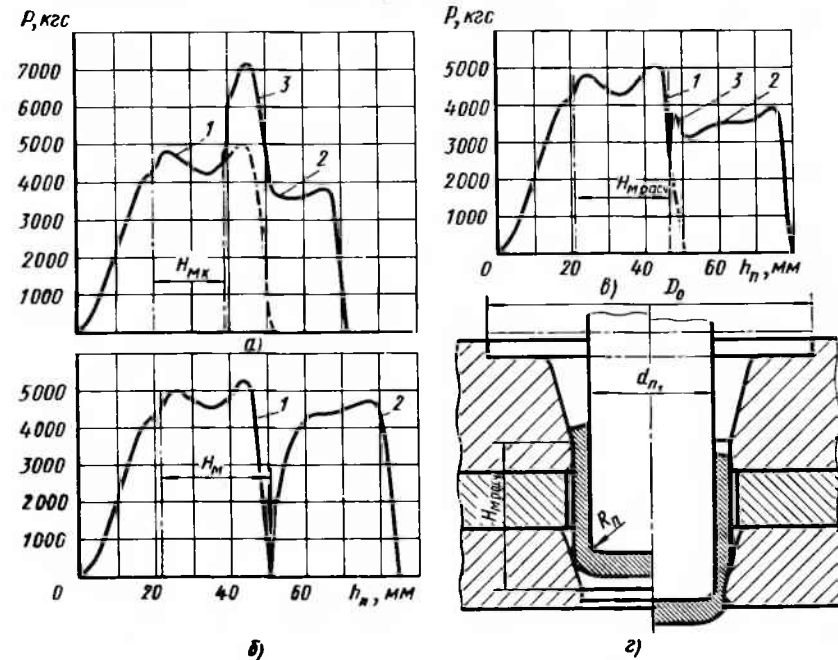


Рис. 32. Кривые усилие — путь комбинированной вытяжки через две матрицы (а, б, в) и схема вытяжки с оптимальным силовым режимом (г): 1 — вытяжка в верхней матрице; 2 — вытяжка в нижней матрице; 3 — вытяжка одновременно в двух матрицах. Материал — сталь Юкп; $m_{d_1} = 0,51$; $m_{s_1}^B = 0,82$; $m_{s_1}^H = 0,82$

процесс деформации в нижней матрице начинается примерно на середине спада усилия верхней матрицы. Здесь потребный ход пресса незначительно увеличивается, зато технологическое усилие снижается на 30—40% и не превышает максимального усилия на одной из матриц (на верхней или на нижней — зависит от распределения деформаций).

При таком методе вытяжки сохраняются известные достоинства вытяжки через две матрицы — плотное охватывание заготовкой пуансона и как результат — использование сил трения на пуансоне, большая точность получаемых изделий и большая производительность.

Снижение потребного усилия позволяет не только использовать прессы меньшим усилием, но и повысить общую степень деформации за переход, так как условия деформации равнозначны здесь условиям при последовательном способе выполнения вытяжки, но без недостатков, присущих последнему.

Описанный прием дает тот же положительный эффект и при операции протяжки через две матрицы стакана, полученного вытяжкой или другим способом.

Глава III. ПОСЛЕДУЮЩИЕ ПЕРЕХОДЫ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫТЯЖКИ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Последующий переход вытяжки осесимметричных изделий без утонения на радиальной и конической матрицах наиболее полно изучен И. А. Норицыным [31] и Е. А. Поповым [32, 36].

Рассматривая формулы для максимального растягивающего напряжения при вытяжке на конической и радиальной матрицах, можно установить, что при прочих равных условиях конический профиль матрицы по сравнению с радиальным обеспечивает снижение напряжения на 15—20%. Это весьма существенно отражается на достижимой степени деформации.

Учитывая это, а также преимущества конического профиля для процесса принудительного утонения, комбинированную вытяжку на последующем переходе необходимо выполнять на конической матрице. В работах [8—12] были экспериментально и теоретически исследованы особенности комбинированной вытяжки на последующих переходах при изготовлении глубоких цилиндрических изделий.

Типовые схемы выполнения последующего перехода комбинированной вытяжки могут быть прямые и реверсивные, со складкодержателем и без складкодержателя (см. рис. 1).

Комбинированную вытяжку на последующем переходе можно проводить двумя вариантами:

- 1) из полый заготовки (рис. 33) с неутоненными стенками (заготовка получена вытяжкой без утонения);
- 2) из полый заготовки (рис. 34) с утоненными стенками (заготовка получена комбинированной вытяжкой, протяжкой, выдавливанием или раскаткой).

В случае 1, например на втором переходе, в зону утонения вытягивается стенка, максимальную толщину которой можно подсчитать приближенно по формуле (для изотропного материала)

$$s_{2к} = s_0 \sqrt{\frac{1}{m_{d_1} m_{d_2}}}. \quad (58)$$



Рис. 33. Последующий переход комбинированной вытяжки:

а — схема процесса деформирования из заготовки с неутоненной стенкой; б — характер кривых усилие—путь: 1 — заготовка с неутоненной стенкой; 2 — заготовка с утоненной стенкой, неотожженная; 3 — заготовка с утоненной стенкой, отоженная

При обычно рекомендуемых коэффициентах вытяжки (например, $m_{d_1}=0,5$; $m_{d_2}=0,73$) толщина края стенки в этом случае будет равна $s_{2к}=1,65 s_0$. Такое увеличение толщины существенно ограничивает значения достижимых степеней деформации на второй операции, так как при коэффициентах утонения, например $m_{s_2} = \frac{s_2}{s_0} = 0,67 \div 0,7$, фактический коэффициент утонения (по утолщенному краю) будет $m_{s_{2к}} = \frac{s_2}{s_{2к}} = 0,36 \div 0,42$.

Значит, такой вариант технологии может быть использован лишь при небольшой разнице в толщине дна и стенки готового изделия или в качестве калибровочной операции при последнем переходе многооперационного технологического процесса вытяжки (без утонения).

Таким образом, в первом случае коэффициент утонения на втором переходе представляет собой отношение толщины стенки после утонения (или величины зазора) к толщине исходного материала. Трудности комбинированного процесса вызваны естественным утолщением стенки, накопленным за два перехода.

В случае 2 коэффициент утонения на втором или последующем переходе обычно принимают как отношение толщины стенки после этого перехода к толщине стенки заготовки — стакана (предварительно утоненной).

Имеющиеся рекомендации по комбинированной вытяжке в основном относятся ко второму варианту. Однако для правильного расчета технологических переходов необходимо учитывать некоторые особенности процесса формоизменения, присущие этому варианту. Пренебрежение этими особенностями может привести к неудачам при внедрении метода.

При комбинированной вытяжке цилиндрических изделий обычно используют коэффициенты уменьшения диаметра, рекомендованные в справочной литературе для вытяжки без утонения [34]. Эти коэффициенты в сочетании с практически проверенными коэффициентами утонения дают возможность получать изделия значительной относительной глубины (за два перехода $H_d \approx 5$).

Попытки увеличить деформацию по диаметру при этих коэффициентах утонения приводят к отрыву дна. Попытки увеличить степень утонения стенки при коэффициентах $m_{d_2} = 0,73 \div 0,85$ вызывают резкое повышение усилия вытяжки в начале операции (см. рис. 33, б). Следствием этого также может быть отрыв дна.

Эти явления, лимитирующие последующий переход комбинированной вытяжки через одну матрицу, объясняются следующим образом.

В вытяжной зазор последующего перехода комбинированной вытяжки, составляющий некоторую часть толщины утоненной стенки заготовки — стакана, в начале этого перехода втяги-

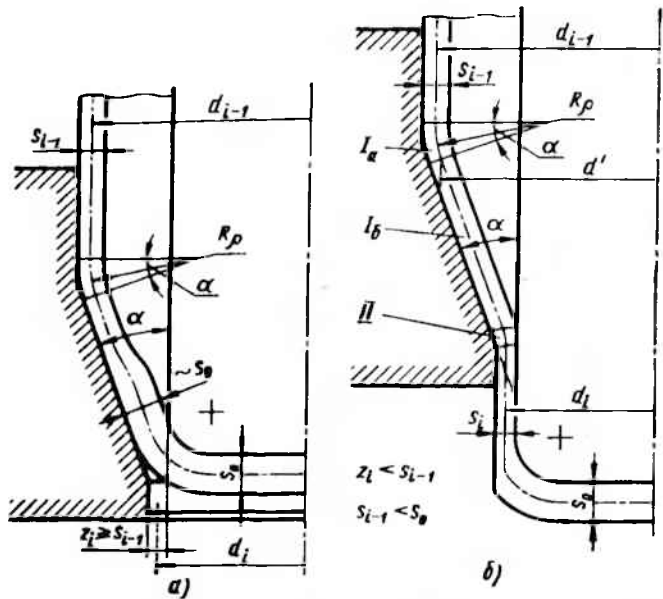


Рис. 34. Схема деформирования на последующем переходе комбинированной вытяжки из заготовки с утоненной стенкой:

а — образование «донного барьера»; б — установившаяся стадия

вается кольцевой участок дна заготовки шириной $\frac{d_{i-1} - d_i}{2}$ и толщиной, почти равной толщине исходного материала. Объем металла этого кольца создает своеобразный барьер (назовем его «донным барьером»), с преодолением которого и связано максимальное усилие в начале операции. При преодолении этого «донного барьера» коэффициент утонения оказывается более «жестким» по сравнению с коэффициентом утонения стенки на этом же переходе.

Естественно, такой коэффициент вызывает значительный подъем (пик) технологического усилия в начале графика усилие—путь последующего перехода комбинированной вытяжки (см. рис. 33, б). На установившейся стадии процесса, когда в вытяжном зазоре деформируется стенка заготовки (толщиной, например, $s_1 = 0,7 s_0$), коэффициент утонения становится равным заданному, и усилие, снижаясь, остается на одном уровне (в случае неупрочненной стенки).

Влияние указанного «донного барьера» в качестве лимитирующего фактора усиливается на третьем переходе в связи с увеличением разницы в толщине стенки и дна заготовки — стакана.

На практике вопрос преодоления «донного барьера» пытаются решать нерациональным путем либо просто уменьшают степень утонения стенки, либо снижают деформацию по диаметру (до $m_{d_i} = 0,9 \div 0,95$), приближаясь к схеме протяжки. И то, и другое увеличивает необходимое число переходов, что производству невыгодно.

Для решения проблемы вытяжки изделий с большой глубиной предложены следующие способы уменьшения влияния указанного «донного барьера» на последующих переходах:

а) последующая комбинированная вытяжка через две матрицы с оптимальным силовым режимом с обычными коэффициентами деформации;

б) новый метод комбинированной вытяжки без утонения стенки;

в) метод комбинированной вытяжки с уменьшением толщины дна заготовки.

2. ВЫТЯЖКА ИЗ ПОЛОЙ ЗАГОТОВКИ С НЕУТОНЕННЫМИ СТЕНКАМИ

Общей особенностью схем комбинированной вытяжки на последующем переходе (при прямой вытяжке) является наличие двух участков в зоне I очага пластической деформации (см. рис. 33, а): участка бесконтактного пространственного изгиба (I, а) и участка вытяжки на конусе матрицы (I, б). Зона II (утонения) аналогична зоне II первого перехода.

В случае комбинированной вытяжки из полой заготовки с неутоненными стенками лимитирующим условием будет то, что степень утонения края заготовки больше, чем предельная степень утонения стенки, т. е.

$$m_{s_{ik}} \leq m_{s_{i\text{пред}}},$$

где

$$m_{s_{ik}} = \frac{s_i \sqrt{m_{d_i}}}{s_{(i-1)k}}.$$

График усилие—путь такой вытяжки (рис. 33, кривая I) характеризуется значительным подъемом на так называемой стационарной стадии, так как в зоне II деформируется все более утолщенная и упрочненная стенка. Как видно, критическим моментом является конечный этап вытяжки, когда в очаг деформации попадает утолщенный и упрочненный в зоне I край. Следствием этого может быть характерный отрыв верхней части стенки заготовки.

Растягивающее напряжение в конце зоны I (рис. 33, а) [9]

$$\sigma_{\rho I} = \beta_1 \sigma_{s_1} \frac{s_{i-1}}{2R_\rho} + \beta_2 \sigma_{s_2} \left(1 + \frac{\mu_m}{\text{tg } \alpha} \right) \ln \frac{1}{m_{d_i}}. \quad (59)$$

Радиус свободного (бесконтактного) изгиба стенки заготовки в зоне I очага пластической деформации определим из условия минимума работы деформации на участке Ia:

$$\frac{da}{dR_\rho} = \frac{d}{dR_\rho} \left[0,575 \frac{s_{i-1}}{R_\rho} - \ln \left(1 - 4 \frac{R_\rho}{d_{i-1}} \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right) \right] = 0;$$

$$R_\rho \approx \frac{0,76}{\sin \alpha} \sqrt{d_{i-1} s_{i-1}}. \quad (60)$$

Подставляя выражение (60) в формулу (59), после преобразований ($\sigma_{s_1} \approx \sigma_{s_2} \approx \sigma_{s_1}$; $\beta_1 \approx \beta_2 = 1,1$) получаем

$$\sigma_{\rho I} = 1,1 \sigma_{s1} \left[\left(1 + \frac{\mu_m}{\text{tg } \alpha} \right) \ln \frac{1}{m_{d_i}} + 0,66 \sin \alpha \sqrt{\frac{s_{i-1}}{d_{i-1}}} \right]. \quad (59')$$

Применяя метод баланса работ и учитывая, что на верхней границе зоны II имеется противонапряжение, вычисляемое по формуле (59), для напряжения в выходном сечении (в начале утонения) получаем формулу, аналогичную формуле (32):

$$\sigma_{\rho II} = \sigma_{z II} = 1,15 \sigma_{s II} \left\{ \left[1 + \frac{\mu_m}{\sin \alpha} \left(1 - \frac{\sigma_{\rho I}}{1,15 \sigma_{s II}} \right) - \frac{\mu_m + \mu_n}{2 \sin \alpha} \times \right. \right.$$

$$\left. \times \ln \frac{1}{m_{s_i}} \right] \ln \frac{1}{m_{s_i}} + \frac{\sigma_{\rho I}}{1,15 \sigma_{s II}} + \frac{\sin \alpha}{2} \right\}, \quad (32')$$

где $m_{s_i} \approx \frac{z_i}{s_0}$.

Для конечного этапа вытяжки при

$$\sigma_{\rho 1} = 0;$$

$$m_{s_i} \approx \frac{z_i}{s_0} \sqrt{m_d} = m_{s_{ik}}$$

или

$$m_{s_i} \approx \frac{z_i}{z_{i-1}} \sqrt{m_{d_i}} = m_{s_{ik}},$$

где $m_d = m_{d_1} m_{d_2} \dots m_{d_n}$, используем формулу (33):

$$\sigma_{z \max} = 1,15 \sigma_{s_k} \left[\left(1 + \frac{2\mu_m - (\mu_n + \mu_m) \ln \frac{1}{m_{s_{ik}}}}{2 \sin \alpha} \right) \ln \frac{1}{m_{s_{ik}}} + \frac{\sin \alpha}{2} \right].$$

3. ВЫТЯЖКА ИЗ ПОЛОЙ ЗАГОТОВКИ С УТОНЕННЫМИ СТЕНКАМИ

В отличие от вытяжки из заготовки с неутоненными стенками условие, лимитирующее комбинированный процесс, в этом случае будет (см. рис. 34)

$$m_{s_d} \leq m_{s_{i \text{пред}}},$$

где m_{s_d} — коэффициент утонения донного участка, переходящего в стенку («донного барьера»).

Традиционный метод комбинированной вытяжки. Рассмотрим традиционную комбинированную вытяжку, когда на последующем переходе производится и деформация по периметру, и утонение стенки в одной матрице, т. е. $m_{s_i} = \frac{z_i}{s_{i-1}} < 1$.

При обычно рекомендуемых коэффициентах утонения $m_{s_1} = 0,6$; $m_{s_i} = 0,6 \div 0,7$ и коэффициентах вытяжки $m_{d_i} = 0,7 \div 0,8$ коэффициент утонения донного участка в критический момент (например, для второго перехода) с учетом взаимной компенсации произвольного утонения и утолщения края дна

$$m_{s_{2d}} = \frac{z_2}{s_d} \approx \frac{z_2}{s_0} = 0,36 \div 0,42.$$

Такие значения коэффициента накладывают некоторые ограничения на возможности интенсификации, т. е. приходится уменьшать общую степень утонения. График усилия — путь такой вытяжки (см. рис. 33, б, кривые 2 и 3) характеризуется пиком усилия при комбинированной вытяжке донного участка. После прохождения донного участка через вытяжной зазор (см. рис. 34, б) усилие снижается в большей или меньшей мере в зависимости от коэффициентов деформации и наличия проме-

жуточной термообработки. При отсутствии промежуточного отжига усилие снова нарастает (см. рис. 33, б, кривая 2).

В критический момент (в начале утонения) может произойти отрыв дна при неправильном расчете коэффициента утонения. Растягивающее напряжение в выходном сечении в этот момент можно определить по формуле (32) при подстановке $m_{s_i} \approx$

$$\approx \frac{z_i}{s_0} \sqrt{m_{d_i}} = m_{s_{ik}}.$$

Противонапряжение от зоны I, вычисляемое по формуле (59), здесь будет меньше, чем в случае комбинированной вытяжки из неутоненной заготовки, так как учитывается сопротивление изгибу утоненной стенки.

Для установившейся стадии (деформирование стенки в вытяжном зазоре) напряжение вычисляется по той же формуле (32) при подстановке $m_{s_i} = \frac{z_i}{s_{i-1}} \sqrt{m_{d_i}}$ (случай, когда $\frac{z_i}{s_{i-1}} < 1$).

Очевидно, растягивающее напряжение, а вместе с ним и усилие вытяжки отожженной заготовки на установившейся стадии меньше, чем при прохождении донного участка, так как меньше степень утонения.

В случае выполнения такой операции без промежуточного отжига усилие на конечном этапе вытяжки может превышать усилие преодоления «донного барьера», так как здесь действуют два фактора: упрочнение и утолщение (см. рис. 33, кривая 2) и возможен отрыв верхней части стенки.

Новый метод комбинированной вытяжки¹. С учетом того, что лимитирующим фактором на последующем переходе является коэффициент утонения донного участка, следует производить расчет последующего перехода по допустимому коэффициенту утонения этого участка, а требуемое утонение стенки выполнять на нижней матрице.

Сущность метода состоит в следующем:

1. Заготовку — стакан получают комбинированной вытяжкой через одну или две матрицы за один или несколько переходов. Основным условием достижения заметного эффекта при этом методе является соотношение $\frac{s_{ст}}{s_d} \leq 0,7 \div 0,75$ (где $s_{ст}$ и s_d — толщина стенки и дна соответственно). Заготовка может быть получена также выдавливанием, раскаткой с утонением.

2. Последующую вытяжку производят после отжига или без него (в зависимости от степени упрочнения), но без утонения стенки. Последнее означает, что вытяжной зазор на этом переходе больше толщины стенки заготовки — стакана или равен ей. Но это же означает, что в начальный момент последующего

¹ С. А. Валиев, Способ получения полых изделий. Авторское свидетельство № 241385, кл. 7 с, 15, МПК В21, 1969.

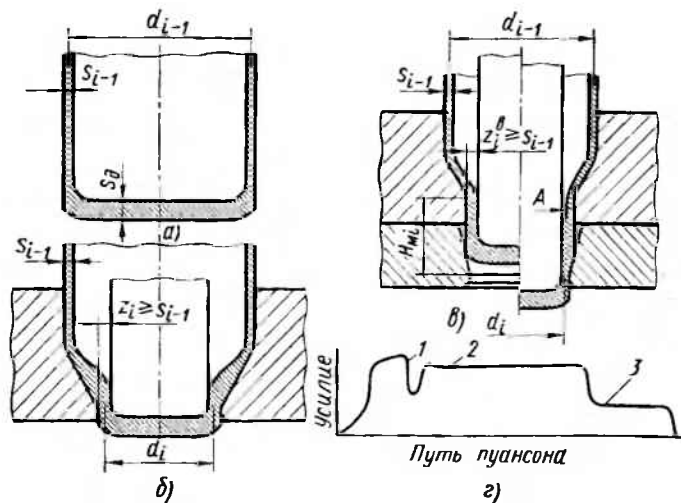


Рис. 35. Последовательность нового метода комбинированной вытяжки:

а — заготовка; б — образование и преодоление «донного барьера»; в — начало деформации в нижней матрице; г — типовый график усилия — путь процесса вытяжки через две матрицы: 1 — усилие на верхней матрице; 2 — усилие одновременной деформации стенки в верхней и нижней матрицах; 3 — усилие протяжки стенки в нижней матрице

перехода происходит комбинированный процесс с утонением дна («донного барьера») заготовки до толщины стенки.

На рис. 35, а, б показаны заготовка и начало деформации ее донного участка по новому методу с зазором $s_d > z > s_{ст.}$. Такой зазор $\left(\frac{z_i}{s_{i-1}} \geq 1\right)$ позволяет производить деформацию толстого донного участка заготовки в пределах «мягких» коэффициентов утонения, в результате чего этот участок переходит в стенку изделия, имея толщину, примерно равную толщине стенки заготовки. При этом в месте перехода стенки заготовки в дно может получиться больший или меньший уступ А, не предусмотренный чертежом изделия, поэтому целесообразнее всего эту операцию выполнять в штампе с двумя матрицами (рис. 35, в).

На нижней матрице в этом случае можно осуществлять протяжку с обычными коэффициентами $m_s = 0,55 \div 0,75$ или лишь калибровку стенки с $m_s = 0,9 \div 0,85$, утоняя нижний участок стенки до толщины верхней части.

Итак, на верхней матрице последующего перехода по описываемому методу комбинированный процесс осуществляется главным образом в пределах дна заготовки, стенка заготовки перетягивается без утонения, а на нижней матрице происходит «чистая» протяжка (или калибровка) всей стенки полуфабриката.

В некоторых случаях вытяжной зазор на верхней матрице может быть равным толщине донного участка заготовки. При этом получается значительный внутренний уступ, который иногда необходим по чертежу в ряде конструкций сосудов. В этом случае операция осуществляется без нижней матрицы, но уступ желательно калибровать ступенчатым пуансоном.

Однако чаще всего требуется, чтобы толщина стенки изделия была равномерной. В этом случае минимальный коэффициент утонения донного участка в верхней матрице необходимо сохранять в пределах допустимых для вытягиваемого материала значений (с некоторым запасом прочности).

Ввиду того, что основное усилие на операции соответствует деформации на верхней матрице толстого дна диаметром d_{i-1} (его можно рассматривать как плоский диск), а предварительно утоненная стенка оказывает сопротивление меньше, чем неутоненная, на величину, пропорциональную ее утонению, степень вытяжки $\left(K_{d_i} = \frac{1}{m_{d_i}}\right)$ здесь может быть увеличена, как

показали исследования, примерно на 25—35%. Если дно вытягивается по комбинированной схеме до толщины стенки, то коэффициент вытяжки на верхней матрице этого перехода при описываемом методе может быть $m_{d_i} = 0,5 \div 0,65$ вместо общепринятых значений $m_{d_i} = 0,75 \div 0,85$. Таким образом, описываемый метод дает возможность осуществлять большую деформацию по диаметру на последующем переходе.

Противонапряжение от деформации утоненной стенки уменьшается с каждым последующим переходом, так как увеличивается разница в толщине дна и стенки; поэтому основной эффект — большая деформация по диаметру — на третьем переходе достигается легче, чем на втором; на четвертом легче, чем на третьем.

Максимальное растягивающее напряжение здесь также определяется по обобщенной формуле (32). При установившейся стадии это напряжение определяется по формуле (59'), как при вытяжке.

Приравнявая максимальное растягивающее напряжение в стенке к максимальному сопротивлению деформированию и решая полученное уравнение относительно m_{s_i} , можно найти выражение для определения предельного коэффициента утонения в критический момент на последующем переходе, аналогичное формуле (46):

$$m_{s_{i\text{пред}}} = - \exp \left(A - \sqrt{A^2 - \frac{\left[2 \left(\frac{0,87}{1 - \psi_p} - \sigma'_1 \right) - \sin \alpha \right] \sin \alpha}{\mu_n + \mu_m}} \right), \quad (46')$$

где

$$A = \frac{\sin \alpha + \mu_M (1 - \sigma_1')}{\mu_n + \mu_M};$$

$$\sigma_1' = (1 + \mu_M \operatorname{ctg} \alpha) \ln \frac{1}{m_{d1}} + 0,66 \sin \alpha \sqrt{\frac{s_D m_{s1}}{m_{d1}}}$$

Для проверки описанного метода комбинированной вытяжки были проведены специальные эксперименты. На рис. 36 показаны образцы, вытягиваемые на втором переходе по новому методу из латуни Л80 ($m_{d2} = 0,58 \div 0,62$) и алюминия АМцА-М ($m_{d2} = 0,60 \div 0,65$), и кривые усилие—путь, записанные при вытяжке образцов из алюминия. Для наглядности процесс вытяж-

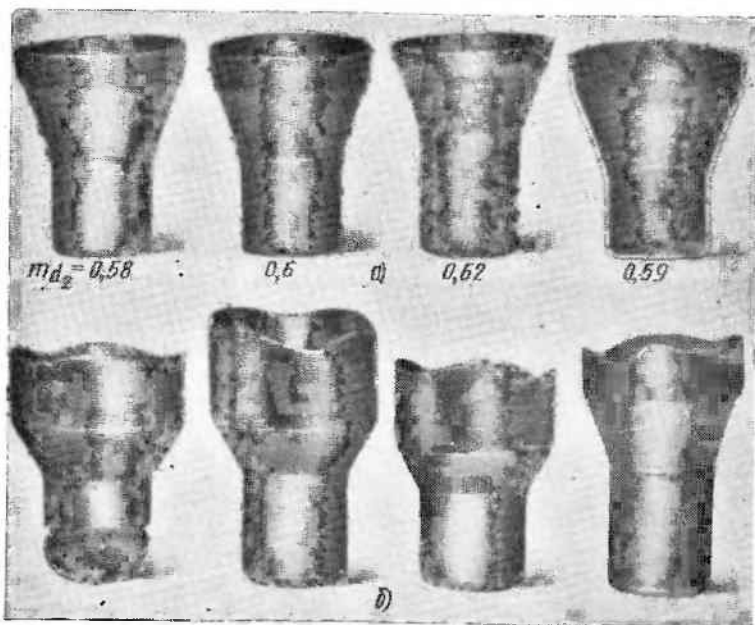


Рис. 36. Второй переход вытяжки по новому методу:

а — образцы из латуни Л80; б — образцы из сплава АМцА-М; в — кривые усилие—путь вытяжки АМцА-М при $z_2 > s_1$ и $m_{d2} = 0,6$; 1 — отрыв дна вследствие большой толщины стенки, $s_1 = 1,2$ мм; см. рис. 6 (первый слева образец); 2 — $s_1 = 1$ мм; 3 — $s_1 = 0,6$ мм

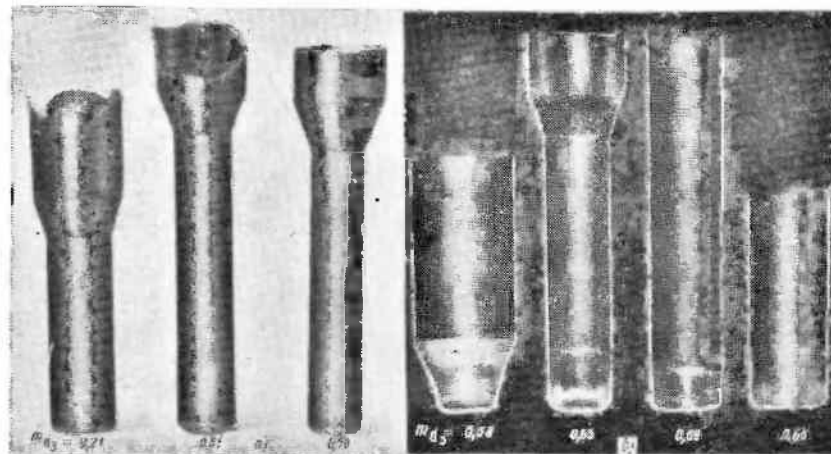
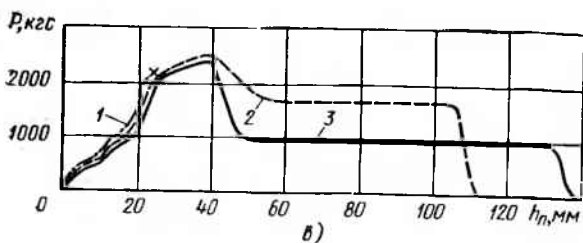


Рис. 37. Третий переход комбинированной вытяжки по новому методу: а — $m_{d3} = 0,71; 0,61; 0,58$, б (слева направо) — первая стадия — деформация дна при $m_{d3} = 0,58$; установившаяся стадия при $m_{d3} = 0,63$ ($s_2 < z_3 < s_D$); вытяжка с $m_{d3} = 0,69$ ($z \approx s_R$); вытяжка с $m_{d3} = 0,65$ ($z_3 \approx s_2$)

ки остановлен на стационарной стадии, когда усилие уже мало и опасности разрыва нет.

Из рис. 36, в следует, что вытяжка по описанному методу может быть успешной только при достаточно малом сопротивлении деформированию стенки. Если стенка недостаточно утонена или сильно упрочнена, происходит отрыв дна (кривая 1). На рис. 37, а показаны образцы из алюминия АМцА-М на третьем переходе, вытянутые по описанному методу с коэффициентами $m_{d3} = 0,58 \div 0,7$.

Из данных табл. 10 и фотографий образцов видно, что на последующем переходе при описанном методе на алюминии и латуни получены коэффициенты $m_{d4} = 0,58 \div 0,65$, которых практически при обычных методах холодной вытяжки достичь нельзя. Эти значения приближаются к предельным коэффициентам последующей вытяжки, приведенным Л. А. Шофманом [41] для стали: $m_{d4 \text{ пред}} = 0,56 \div 0,60$.

Для сравнения в табл. 10 приведены данные по традиционному (с коэффициентами утонения стенки $m_{s2} < 1$) методу комбинированной вытяжки стали.

Довольно высокие степени вытяжки ($m_{d2} = 0,61 \div 0,66$), полученные без промежуточного отжига полуфабриката, свидетельствуют о резервах комбинированной вытяжки, связанных в данном случае со значительным произвольным утонением донной части и принудительным утонением стенок заготовки — стакана на предыдущих переходах.

Таблица 10

Результаты экспериментальной проверки нового метода
комбинированной вытяжки (без утонения стенки)

| Заготовка—стакан | | Второй переход | | | Третий переход | | |
|--------------------------------------|-----------|----------------|-----------|-----------------|----------------|-----------|-----------|
| $d \times s$ | m_{s_1} | m_{s_2} | m_{s_d} | m_{d_2} | m_{s_3} | m_{s_d} | m_{d_3} |
| Материал АМцА-М, $s_0 = 1,73$ мм | | | | | | | |
| 51,75×1,73 | 1,0 | 1 | 1 | 0,565 | — | — | — |
| 48,5×1,51 | 0,875 | 1 | 1 | (разрыв) 0,6 | — | — | — |
| 48,5×1,25 | 0,72 | 1 | 1 | (разрыв) 0,6 | — | — | — |
| 49×1,0 | 0,575 | 1 | 1 | (разрыв) 0,6 | — | — | — |
| 63×1,1 | 0,635 | 1 | 0,73 | 0,615 | — | — | — |
| 59×1,0 | 0,575 | 1 | 0,73 | 0,625 | — | — | — |
| 59×1,0 | 0,575 | 1 | 0,76 | 0,65 | — | — | — |
| 49,45×0,6 | — | — | — | — | 1 | 0,91 | 0,67 |
| 49,50×0,55 | — | — | — | — | 1 | 1 | 0,7 |
| 49,50×0,55 | — | — | — | — | 1 | 0,69 | 0,625 |
| 49,50×0,55 | — | — | — | — | 1 | 0,83 | 0,58 |
| Материал Л80, $s_0 = 0,95$ мм | | | | | | | |
| 52×0,7 | 0,738 | 1 | 0,85 | 0,58 | — | — | — |
| 50×0,7 | 0,738 | 1 | 0,85 | 0,60 | — | — | — |
| 48×0,7 | 0,738 | 1 | 0,85 | 0,62 | — | — | — |
| Материал сталь 08кп, $s_0 = 1,35$ мм | | | | | | | |
| 32×1 | 0,74 | 0,8 | 0,615 | 0,68 | — | — | — |
| 30×1 | 0,74 | 0,9 | 0,68 | 0,66 | — | — | — |
| 32×1 | 0,74 | 0,9 | 0,68 | 0,61 | — | — | — |
| 28×1 | 0,74 | 0,8 | 0,615 | 0,63 | — | — | — |

Учет влияния упрочнения. Сопоставление расчетных и экспериментальных усилий на втором переходе вытяжки с промежуточным отжигом показывает, что учет влияния упрочнения можно проводить по степенной зависимости. Средние значения сопротивления деформированию можно вычислить для зоны I по формуле

$$\sigma_{sI} = \sigma_B \left(\frac{1 - m_{d_i}}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}},$$

для зоны II

$$\sigma_{sII} = \sigma_B \left(\frac{1 - m_{d_i} m_{s_i}}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}},$$

где при утонении «донного барьера»

$$m_{s_i} = m_{s_d} = \frac{z_i}{0,9s_0} m_{d_i}^{\frac{1}{1+r_{cp}}} \approx \frac{z_i}{0,9s_0} \sqrt{m_{d_i}},$$

а при утонении стенки

$$m_{s_i} = \frac{z_i}{s_{i-1}} m_{d_i}^{\frac{1}{1+r_{cp}}} \approx \frac{z_i}{s_{i-1}} \sqrt{m_{d_i}}.$$

Линейная функция упрочнения также дает хорошие результаты.

Зона I:

$$\sigma_{sI} = \frac{\sigma_B \left(1 - \psi_p + \frac{1 - m_{d_i}}{2} \right)}{(1 - \psi_p)^2};$$

зона II:

$$\sigma_{sII} = \frac{\sigma_B \left[2(1 - \psi_p) - \frac{m_{d_i}}{2}(1 + m_{s_i}) \right]}{(1 - \psi_p)^2}.$$

Отклонение расчетных значений усилий от экспериментальных не превышало 5%.

При выполнении последующего перехода без промежуточного отжига возникают два критических момента: 1) утонение «донного барьера» и 2) момент прохождения через зону I края стенки заготовки с одновременным утонением в вытяжном зазоре.

Усилие на операции достигает максимума во второй критический момент (см. рис. 33, б, кривая 2). Среднее сопротивление деформированию в зоне I — деформация стенки заготовки до зоны утонения

$$\sigma_{sI} = \sigma_B \left(\frac{1 - m_d m_{s_1}}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}},$$

где $m_d = m_{d_1} m_{d_2} \dots m_{d_{n-1}} m_{d_n}$ — суммарный коэффициент вытяжки.

Среднее сопротивление деформированию стенки в зоне II

$$\sigma_{sII} = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_p} \left(\frac{\psi_{cp}}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}},$$

где $\psi_{cp} = 1 - 0,5 \frac{m_d m_s}{m_{d_n} m_{s_n}} (1 + m_{d_n} m_{s_n})$ — среднее значение степени деформации;

$m_s = m_{s_1} m_{s_2} \dots m_{s_{n-1}} m_{s_n}$ — суммарный коэффициент утонения.

Среднее сопротивление деформированию «донного барьера» в данном случае можно определить по формуле

$$\sigma_s = \sigma_b \left(\frac{1 - m_{d_i} m_{s_d}}{\psi_p} \right)^{\frac{\psi_p}{1 - \psi_p}}$$

Отклонения расчетных и экспериментальных данных и здесь не превышали $\pm 5\%$.

4. ВЫТЯЖКА ЧЕРЕЗ ДВЕ МАТРИЦЫ НА ПОСЛЕДУЮЩИХ ПЕРЕХОДАХ

При исследовании было выполнено большое количество экспериментов.

На рис. 38 представлены для сравнения графики усилие — путь комбинированной вытяжки через одну и через две матрицы отожженной заготовки, полученной предварительно комбинированной вытяжкой, а также схема вытяжки через две матрицы, соответствующая кривой 2.

Эксперименты показали, что максимальное усилие на операции (точка А), соответствующее комбинированной вытяжке одновременно в двух матрицах, равно по величине примерно сумме усилий стационарных процессов комбинированной вытяжки на верхней матрице и последующей протяжке этой же заготовки раздельно на нижней матрице.

Так же, как и на первом переходе, при вытяжке через две матрицы на последующем переходе целесообразно создать оп-

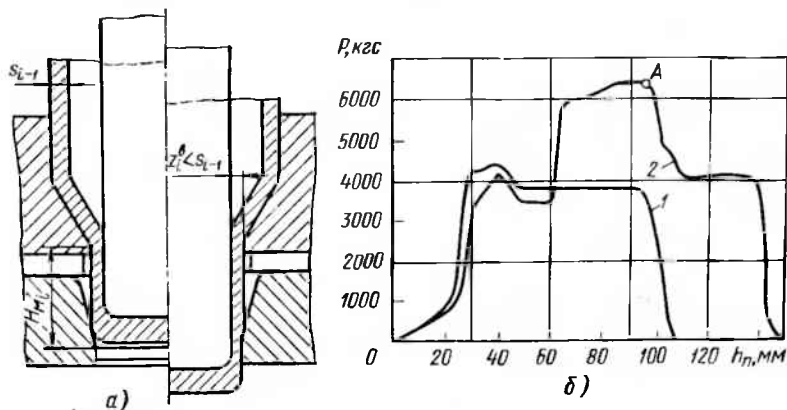


Рис. 38. Схема последующей операции комбинированной вытяжки через две матрицы (а) и кривые усилий вытяжки (б):

1 — вытяжка через одну (нижнюю) матрицу; 2 — вытяжка через две матрицы (по схеме). Материал — латунь Л80; $m_{d_2} = 0,74$; $m_{s_2}^B = 0,76$; $m_{s_2}^H = 0,76$

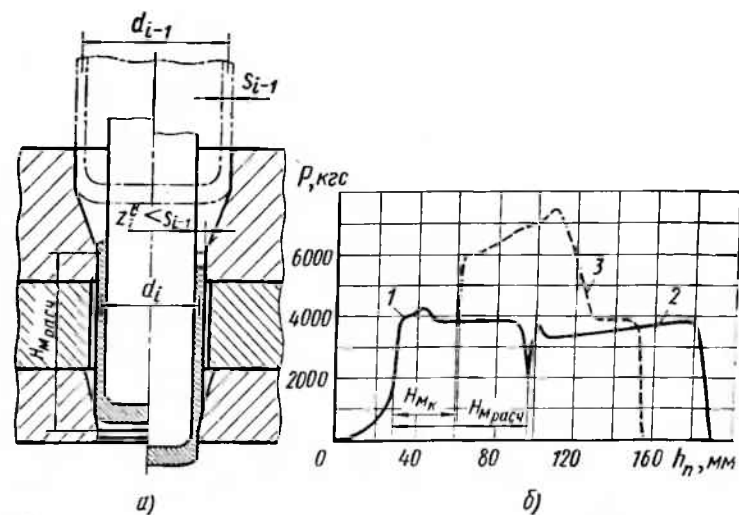


Рис. 39. Схема последующей операции комбинированной вытяжки через две матрицы с оптимальным силовым режимом (а) и соответствующий ей график усилие — путь (б):

1 — усилие на верхней матрице; 2 — усилие на нижней матрице; 3 — усилие одновременной деформации при неоптимальном режиме вытяжки. Материал — латунь Л80; $m_{d_2} = 0,74$; $m_{s_2}^B = 0,64$; $m_{s_2}^H = 0,71$

тимальные условия, исключаяющие сложение больших технологических усилий на верхней и нижней матрицах при сохранении центрации вытяжного пуансона стенкой полуфабриката в верхней матрице в момент начала деформации в нижней.

На рис. 39 показана схема второго перехода комбинированной вытяжки через две матрицы с расчетным расстоянием между ними $H_{м.расч}$ и типовой график усилие — путь такой вытяжки в сравнении с графиком неоптимального режима выполнения процесса с конструктивно принятым расстоянием между матрицами $H_{м.к}$.

Максимальное усилие при вытяжке по новому методу также соответствует стадии деформирования дна. Как только технологическое усилие снижается до усилия деформирования стенки, можно начинать процесс протяжки заготовки в нижней матрице (см. рис. 35, з). Здесь нет необходимости откладывать начало деформирования в нижней матрице до спада усилия деформирования стенки, так как оно достаточно мало ввиду отсутствия утонения стенки на верхней матрице. Кроме того, например на третьем переходе, из-за большой глубины заготовки — стакана потребовался бы слишком большой ход пресса.

Результаты экспериментов и производственных испытаний последующих переходов комбинированной вытяжки через одну и через две матрицы приведены в табл. 11 и 12.

Таблица 11

Параметры второго перехода комбинированной вытяжки
толстостенных заготовок

| Материал и размеры заготовки (мм) | Размеры заготовки—стакана, мм | | m_{d_2} | m_{s_2} | $\Psi_{K, \%}$ | Условия вытяжки | Результаты вытяжки |
|-----------------------------------|-------------------------------|---------------|-----------|-----------|----------------|--------------------|---------------------|
| | диаметр d_1 | толщина s_1 | | | | | |
| Латунь Л68 $D_0=46$ $s_0=6$ | 24,46 | 2,44 | 0,77 | 0,38 | 70,8 | Через две матрицы | 100% без разрушения |
| | 24,16 | 2,74 | 0,78 | 0,34 | 73,5 | | То же |
| | 23,85 | 3,05 | 0,79 | 0,30 | 76,3 | | 50% разрушенных |
| Сплав АМцА-М $s_0=4,5$ | 52 | 3,15 | 0,73 | 0,70 | 49 | Через одну матрицу | 100% без разрушения |
| | 52 | 2,25 | 0,71 | 0,90 | 36 | | То же |
| | 49 | 3,15 | 0,71 | 0,67 | 52,5 | | » |
| | 49 | 2,70 | 0,67 | 0,78 | 48 | | » |
| | 52 | 3,15 | 0,73 | 0,57 | 58 | | 100% разрушенных |

Таблица 12

Параметры второго перехода комбинированной вытяжки
тонкостенных заготовок

| Материал и размеры заготовки | Размеры заготовки—стакана, мм | | m_{d_2} | m_{s_2} | $\Psi_{K, \%}$ | Условия вытяжки | |
|--|-------------------------------|-------|-----------|----------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|
| | d_1 | s_1 | | | | | |
| Сталь 08кп $s_0=0,93$ мм $s_0=0,85$ мм | 112 | 0,60 | 0,78 | 0,67 | 48 | Через одну матрицу | |
| | 112 | 0,55 | 0,78 | 0,73 | 43 | | |
| Латунь Л80 $s_0=0,95$ мм | 52 | 0,65 | 0,77 | 0,75 0,57 0,55 | 42,5 56 57,5 (обрыв) | | |
| | 54 | 0,65 | 0,74 | 0,62 0,57 | 54 58 | | |
| Латунь Л80 $s_0=0,95$ мм | 50 | 0,65 | 0,76 | 0,49 | 63 | | |
| Стали X18H10T и 0X18H10T $s_0=1,05$ мм | 52 | 0,65 | 0,77 | 0,55 0,49 | 58 62,5 | | Через две матрицы |
| | 54 | 0,65 | 0,78 | 0,55 0,49 | 57,5 62 | | |
| | 58 | 0,7 | 0,76 | 0,55 0,49 | 57 63 | | |
| | 65 | 0,65 | 0,77 | 0,55 0,49 | 58 62,5 57,5 | | |

5. ВЫТЯЖКА КОРОбЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ПОСЛЕДУЮЩИХ ПЕРЕХОДАХ

Как отмечалось, за первый переход вытяжки коробчатых деталей по новому методу, без утонения, можно получить относительную глубину $\frac{H_1}{B}=1\div 1,5$. Применяя комбинированный

процесс вытяжки, можно получить $\frac{H_1}{B}=1,5\div 2,5$.

В соответствии с этим для более глубоких деталей требуется число переходов вытяжки больше одного. Число переходов вытяжки зависит от конструктивных параметров детали, марки материала и способа выполнения вытяжки (с прижимом или без прижима, с утонением или без утонения, через одну или через две матрицы).

Пока еще нет достаточного опыта внедрения комбинированной вытяжки коробчатых деталей, поэтому методика расчета не дифференцирована по таким критериям, как отношение сторон прямоугольника $A : B$ или относительная высота $H : A$ ($H : B$). Согласно данным работы [25], больше всего выпускается дета-

лей со следующими параметрами: квадратные $\frac{H}{B}=0,5\div 2,5$;

прямоугольные $\frac{A}{B}=1,2\div 3,5$; $\frac{H}{B}=0,5\div 5$. При этом число переходов вытяжки без утонения составляет от 2 до 7.

Эксперименты показывают, что применение комбинированной вытяжки для изготовления коробчатых деталей дает возможность сократить число переходов примерно в 2 раза. При числе переходов комбинированной вытяжки больше одного предварительные переходы для квадратных и некоторых прямоугольных деталей должны иметь форму круглого цилиндра. Для прямоугольных деталей, имеющих заготовку в форме «эллипсоидного овала», оптимальными контурами предварительных переходов является семейство конфокальных «эллипсоидных овалов» [5].

Так как метод опережающей деформации угловых элементов прямоугольного контура, разработанный для первого перехода, применим и на последнем переходе многооперационной технологии вытяжки, здесь также можно получить довольно большие степени вытяжки. Если последнюю операцию выполнить по методу комбинированной вытяжки без утонения стенки (см. стр. 73) на верхней матрице с протяжкой на нижней, то большинство глубоких коробчатых деталей может быть изготовлено за две операции.

Это подтверждается результатами специальных экспериментов, поставленных автором данной книги. Результаты опытов приводятся в табл. 13.

Параметры двухпереходной комбинированной вытяжки квадратной коробчатой детали ($B = 23$ мм; $r_y = r_d = 2$ мм)

| Размеры заготовки, мм $D_0 \times s_0$ | Первый переход | | | Размеры заготовки — стакана, мм $d_1 \times s_1$ | Второй переход | | | |
|---|----------------|-----------|-------|---|----------------|----------|-------|----------------------|
| | m_{d_1} | m_{s_1} | H_d | | $m_{кп}$ | $m_{кн}$ | m_k | $\frac{b_{п1}}{s_1}$ |
| $66 \times 1,35$ | 0,51 | 0,68 | 1,05 | $34 \times 0,92$ | 0,92 | 0,78 | 0,40 | 5 |
| $82 \times 1,2$ | 0,5 | 0,58 | 1,2 | $41 \times 0,7$ | 0,93 | 0,66 | 0,33 | 11,5 |
| $90 \times 1,2$ | 0,56 | 0,58 | 1,0 | $50 \times 0,7$ | 0,92 | 0,54 | 0,30 | 17,5 |
| $96 \times 1,2$ | 0,485 | 0,67 | 1,4 | $46,5 \times 0,8$ | 0,92 | 0,58 | 0,28 | 13 |

На графиках усилие—путь вытяжки квадратной коробчатой детали из цилиндрического стакана (рис. 40) видно, что основная нагрузка на опасное сечение приходится при деформировании дна заготовки, но благодаря рациональной геометрии матрицы эта нагрузка невелика, что позволяет получать значительные деформации по периметру. Ниже приведен анализ результатов некоторых экспериментов.

1. Коробчатое изделие квадратного сечения со стороной $B = 23$ мм и $\frac{H}{B} = 1,8$ из стали 08ВГ было получено за два перехода. Первый переход — комбинированная вытяжка цилиндра из круглой заготовки с $D_0 = 66$ мм; $s_0 = 1,35$; $d_1 = 34$ мм; $s_1 = 0,92$ мм; $m_{s_1} = 0,68$. Имеются незначительные фестоны по краю. Второй переход — вытяжка на квадрат без отжига (рис. 41, а) и без складкодержателя. Показаны образец (первый справа) с ровным краем, полученным при положении заготовки «впадина в угол», и образец (второй) при положении заготовки «фестон в угол».

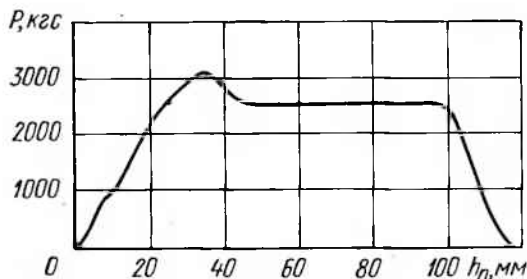


Рис. 40. Типовой график усилие — путь. Материал — сталь 10кп.

Предельно допустимый коэффициент такой вытяжки по Вайнтраубу [5].

$$m_{кп} = 1 - \frac{1,3r_y}{\sqrt{HB}} = 1 - \frac{1,3 \cdot 2}{\sqrt{23 \cdot 46}} = 0,92,$$

а фактический в опытах

$$m_{кн} = \sqrt{\frac{F_{д1}}{F_{д1-1}}} = \sqrt{\frac{23^2}{34^2} \cdot 1,27} = 0,78,$$

где $F_{д1}$, $F_{д1-1}$ — площади дна изделия и заготовки.

Это значение коэффициента (0,78) сравнимо с коэффициентами цилиндрической вытяжки на втором переходе.

Необходимость складкодержателя определяют по критерию

$$b_{п1} = \frac{d_1 - B}{2s_1}.$$

Для вытяжки без складкодержателя этот критерий рекомендуется брать не более $(6-8)s_1$ [5]. В данном опыте $b_{п1} = 5s_1$.

2. На рис. 41, б показаны переходы вытяжки квадратной коробчатой детали с размером сторон $B = 23$ мм и высотой $H = 80$ мм из цилиндрического стакана диаметром 41 мм, высотой 50 мм, толщиной стенки $s_1 = 0,7$ мм и толщиной дна 1,2 мм.

Вытяжку проводили без отжига. Несмотря на соотношение размеров заготовки и детали $b_{п1} = 12,8s_1$, складкообразования не наблюдалось. Предельно допустимый коэффициент вытяжки (по Вайнтраубу) здесь значительно превзойден:

$$m_{кп} = 1 - \frac{1,3 \cdot 2}{\sqrt{23 \cdot 80}} = 0,93;$$

$$m_{кн} = \sqrt{1,27 \cdot \frac{23^2}{41^2}} = 0,63.$$

Стакан был изготовлен комбинированной вытяжкой из заготовки $D_0 = 82 \times 1,2$, поэтому суммарный коэффициент вытяжки

$$m_k = \sqrt{\frac{F_{д1}}{F_0}} = \sqrt{1,27 \cdot \frac{23^2}{82^2}} = 0,318,$$

где F_0 — площадь плоской заготовки.

При таком коэффициенте обычно требуется четыре перехода вытяжки без утонения. Применение нового метода комбинированной вытяжки позволяет за два перехода получить деталь даже большей высоты.

3. На рис. 41, в показаны два перехода вытяжки квадратной коробчатой детали с $B = 23$ мм и высотой $H \approx 110$ мм.

Первый переход — вытяжка цилиндрического стакана диаметром $d_1 = 46,5$ мм из заготовки $D_0 = 96 \times 1,2$. Высота стакана 65 мм, толщина стенки 0,8 мм.



Рис. 41. Примеры двухпереходной технологии комбинированной вытяжки квадратных деталей со стороной $B=23$ мм из стали:

$a - D_0=66$ мм, $s_0=1,35$ мм, $d_1=34$ мм, $s_1=0,9$ мм (без отжига); $б - D_0=82$ мм, $s_0=1,2$ мм, $d_1=41$ мм, $s_1=0,7$ мм (без отжига); $а - D_0=96$ мм, $s_0=1,2$ мм, $d_1=46,5$ мм, $s_1=0,8$ мм (с отжигом)

Вытяжку проводили после отжига заготовки без складкодержателя. Складки не образовались, хотя расстояние между стенками заготовки и детали $b_{\text{п}} \approx 14 s_1$.

За два перехода достигнут суммарный коэффициент

$$m_k = \sqrt{1,27 \cdot \frac{23^2}{96^2}} = 0,27,$$

для которого обычно требуется 4—5 переходов вытяжки без утонения. Вытяжку (последнюю) квадратной детали осуществляли при коэффициенте $m_{\text{ки}}=0,56$ вместо рекомендуемого $m_{\text{ки}}=0,90 \div 0,93$ [34].

4. Вытяжка квадратной коробчатой детали из цилиндрического стакана ($d_1=51$ мм, $s_1=0,8$ мм) была выполнена с фактическим коэффициентом $m_{\text{ки}}=0,81$ и суммарным $m_k=0,29$.

Указанных коэффициентов невозможно достичь при обычной вытяжке коробчатых изделий.

На фотографиях для наглядности показаны полуфабрикаты, процесс вытяжки которых не закончен. Вытяжка остановлена на стационарной стадии, когда усилие уже мало, поперечного разрыва стенки произойти не может, нет никаких препятствий для окончания деформации. Видна граница перехода дна заготовки в стенку. При вытяжке через одну матрицу здесь может появиться размерный уступ вследствие большего, чем толщина стенки, вытяжного зазора (метод комбинированной вытяжки без утонения стенки). При вытяжке через две матрицы стенка получается калиброванной, так как на нижней матрице можно задать необходимое утонение. Расстояние между рабочими по-

ясками матриц при этом следует рассчитывать с учетом прохождения через верхнюю матрицу толстого дна, т. е. деформация на нижней матрице должна начинаться лишь при стационарной стадии вытяжки в верхней матрице.

Многопереходная вытяжка деталей в форме прямоугольника отличается от технологии многопереходной вытяжки квадратных изделий лишь овальными контурами промежуточных переходов.

6. РЕВЕРСИВНАЯ КОМБИНИРОВАННАЯ ВЫТЯЖКА

Поскольку растягивающие напряжения в опасном сечении при реверсивной вытяжке без утонения на 20—25% больше, чем при прямой вытяжке через радиальную матрицу, по-видимому, нерационально выполнять последующий переход комбинированной вытяжки по схеме, принятой в работе [2].

Эта схема имеет два принципиальных недостатка:

а) стенка полой заготовки мало утонена ($m_s=0,9$);

б) рабочий профиль матрицы в зоне утонения выполнен по радиусу, угол касательной к которому в месте сопряжения с рабочим пояском составляет 0° с осью вытяжки.

Эти недостатки обуславливают небольшую степень вытяжки ($m_{d_i} = 0,75 \div 0,85$), что, в свою очередь, определяет недостаточную толщину стенок матрицы или ее малую относительную прочность.

Совершенно неприемлема для реверсивной комбинированной вытяжки схема вытяжки из заготовки с неутоненными стенками. В частности, в этом случае максимальные распирающие нагрузки на матрицу приходятся на конец процесса, когда стенка полой заготовки не охватывает ее снаружи.

Наиболее рационально производить на последующем переходе реверсивную комбинированную вытяжку по новому

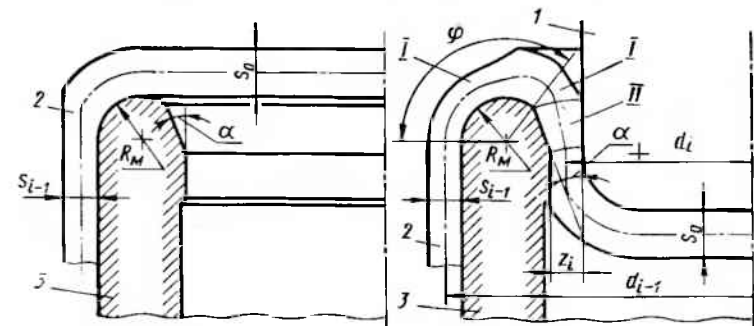


Рис. 42. Схема реверсивной комбинированной вытяжки по новому методу:

1 — пуансон; 2 — заготовка со стенкой толщиной $s < 1,75 s_0$; 3 — матрица

методу (без утонения стенки), описанному выше для прямой схемы вытяжки. Для этого заготовка должна иметь утоненные стенки (рис. 42), т. е. $s_{i-1} \leq 0,75 s_0$. Так как при этом можно осуществлять значительную деформацию по диаметру, увеличивается толщина стенок и относительная прочность вытяжной матрицы. Кроме того, в момент пиковой нагрузки заготовка плотно охватывает матрицу снаружи.

Очаг пластической деформации при реверсивной комбинированной вытяжке можно разделить на две зоны (см. рис. 42): зона изгиба с трением на ребре матрицы (I), зона принудительного утонения на коническом участке матрицы (II).

Осевое растягивающее напряжение в критический момент определится по формуле (32') с подстановкой

$$\sigma_{\rho I} = 1,1\sigma_{s_i} \left(\ln \frac{1}{m_{d_i}} + \frac{s_{i-1}}{4R_M} \right) \left(1 + \frac{3}{4} \mu_M \right) \quad (61)$$

II

$$m_{s_i} = m_{s_d} = \frac{z_i}{0,9s_0} m_{d_i}^{\frac{1}{1+r_{cp}}} \approx \frac{z_i}{0,9s_0} \sqrt{m_{d_i}}$$

Глава IV. ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫТЯЖКИ

1. КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЙ

Широкое распространение холодной штамповки, в том числе глубокой вытяжки, в точном машиностроении, приборостроении и в других отраслях требует количественной оценки качества (точности) штампованных деталей.

К сожалению, в специальной литературе уделяется этому вопросу недостаточно внимания, а данные некоторых авторов [34, 26] нуждаются в серьезной корректировке, так как не учитывают, например, изменения свойств (анизотропии, упрочнения материала). Кроме того, эти данные не содержат сведений о точности по толщине полых деталей, в частности, получаемых вытяжкой с утонением. Нет также данных о чистоте поверхности штампованных деталей.

Для повышения качества в технологии вытяжки без утонения цилиндрических и коробчатых изделий используют дополнительные операции калибровки и шлифования. Это увеличивает себестоимость изделия. Кроме того, операция калибровки будет малоэффективной, если ее выполнять, как рекомендуется в работе [23]: «калибровочная операция осуществляется при зазорах $z = (1,0 \div 1,1) s_0$ ». Как отмечалось в гл. I, в таком зазоре можно откалибровать только верхнюю половину стенки изделия, так как часть стенки, прилегающая к донному закруглению, имеет произвольное утонение примерно до $0,80 s_0$.

Очевидно, проблема повышения качества полых изделий может быть решена путем использования новых технологических приемов и схем деформирования, новых составов и методов нанесения технологических смазок. Но при этом технологический цикл изготовления изделий не должен увеличиваться.

Аналитическое определение суммарной погрешности штампуемой детали связано с большим числом переменных факторов, которые изучены недостаточно, поэтому большое значение имеет накопление экспериментальных данных для разработки классов точности (и системы технологических допусков) деталей, получаемых глубокой вытяжкой.

Для определения величин и характера погрешностей полых деталей автором были поставлены специальные эксперименты по вытяжке стали 08кп и латуни Л63 в диапазоне зазоров $z = (1,4 \div 0,7) s_0$ с тремя степенями вытяжки. Опыты проводили на испытательном гидравлическом прессе с фиксацией максимальных усилий и выборочной записью диаграмм усилие—путь.

Для указанного диапазона зазоров, обеспечивающих переход от схемы вытяжки к схеме комбинированной вытяжки, использовали комплекты матриц с радиальной и конической заходной частью и с различными диаметрами. Диаметр пуансона был неизменным (33 мм).

Перед вытяжкой толщину заготовок тщательно измеряли с помощью микрометра. После вытяжки внешние диаметры стаканов измеряли в двух точках образующих боковой поверхности: у перехода стенки в закругление у дна и у верхнего края с помощью микрометра с точностью до 0,01 мм. В тех же точках измеряли толщину стенки стаканов с помощью микрометра со сферическими измерительными поверхностями. Высоту стаканов измеряли штангенциркулем с точностью до $\pm 0,5$ мм.

Ввиду того, что сталь и латунь имели плоскостную анизотропию, проявившуюся в образовании небольших фестонов, указанные измерения проводили по образующим фестонов и впадин, т. е. под углами $\theta = 0^\circ$; 90° и 45° к направлению прокатки (фестоны у стаканов из стали располагались вдоль и поперек прокатки, у стаканов из латуни — под углом 45°). Схема измерения размеров стального стакана показана на рис. 43.

Результаты измерений подтвердили, что плоскостная анизотропия и величина зазора существенно влияют на размеры и форму вытянутых изделий.

Толщина вдоль стенки изменяется по фестону и по впадине с различной интенсивностью: по краю впадины утолщение значительно больше, чем по краю фестона. Произвольное утонение в опасном сечении (у дна) практически одинаково как по оси впадины, так и по оси фестона, т. е. в этом месте анизотропия заметно не сказывается на изменении толщины вследствие малой степени деформации.

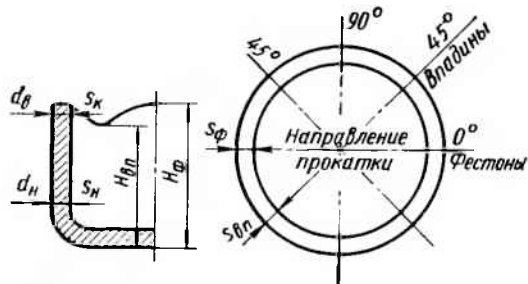


Рис. 43. Схема измерений размеров вытянутого стакана

Если известны коэффициенты нормальной анизотропии листа r_θ под различными углами к направлению прокатки (r_0 , r_{90} , r_{45}), то толщину края стакана, вытянутого без утонения из анизотропного материала, можно вычислить отдельно по фестонам и впадинам по формуле (9) при значении показателя степени в формуле (10) [9, 40]:

для направления вдоль прокатки

$$f = \frac{1}{1 + r_{90}};$$

для направления поперек прокатки

$$f = \frac{1}{1 + r_0};$$

для направления под углом 45° к направлению прокатки

$$f = \frac{1}{1 + r_{45}}.$$

На рис. 44 показан различный характер утолщения стенки стаканов по образующей фестона и впадины при вытяжке без утонения. Эти данные удовлетворительно согласуются с расчетами по формуле (9).

Расчеты по указанной формуле показывают, что чем больше разница в численных значениях коэффициентов r_{45} и r_0 (r_{90}), тем больше разница в утолщении стенки по впадине и фестону. Ввиду того, что в листовой штамповке чаще всего используется анизотропный материал, более полно отражают процесс графики распределения толщины в стенках изделий при вытяжке, построенные по образующим впадины и фестона (рис. 44), чем графики, построенные вдоль одного сечения, обычно приводимые в литературе [28, 34].

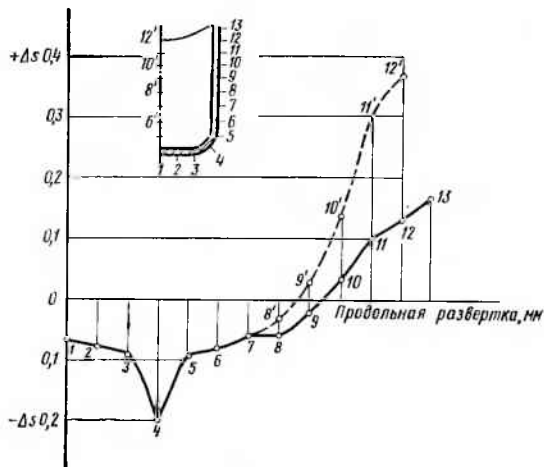
Колебания толщины вдоль стенки (в меридиональном сечении) могут быть количественно оценены как непараллельность (по ГОСТу 10356—63) образующих $\Delta s_{вд}$ внутренней и внешней поверхностей стакана соответственно по впадине и по фестону (принимая условно, что толщина стенки изменяется по линейному закону от самого дна):

$$\left. \begin{aligned} \Delta s_{вд. вп} &= s_{вп} - s_{н'} \\ \Delta s_{вд. ф} &= s_{ф} - s_{н'} \end{aligned} \right\} \quad (62)$$

где $s_{вп}$ и $s_{ф}$ — толщина края стакана соответственно по впадине и по фестону;

$$s_{вп} = s_0 (K_d)^{\frac{1}{1+r_{\min}}};$$

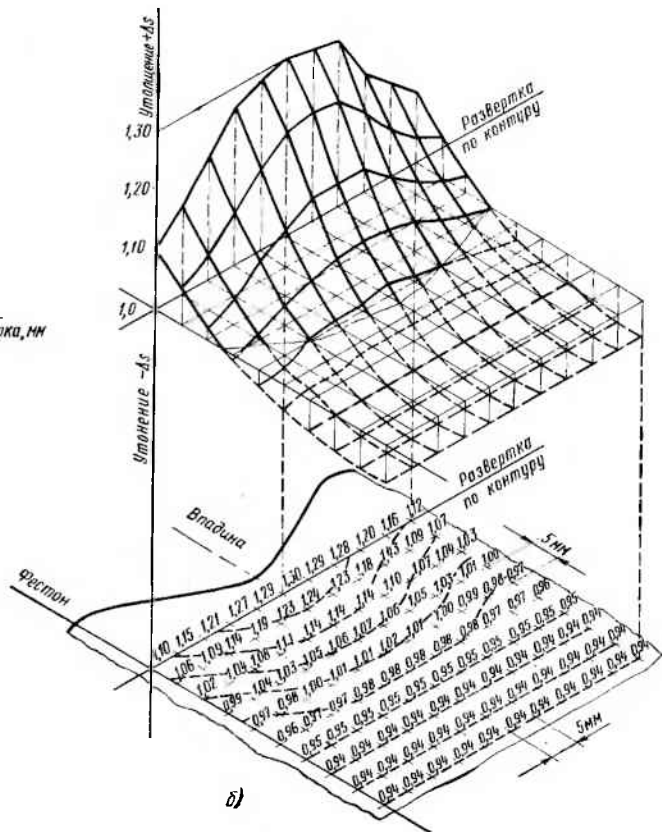
$$s_{ф} = s_0 (K_d)^{\frac{1}{1+r_{\max}}},$$



a)

Рис. 44. Распределение толщины в стенке стакана, вытянутого без утонения из анизотропного материала:

а — плоский график: — по впадине, — по фестону. Материал — бронза Бр.Б2, $s_0=1$ мм, $m_{d_1}=0,46$; б — пространственный график. Материал — лента из низкоуглеродистой стали; $s_0=1$ мм; $m_{d_1}=0,48$



б)

r_{\min} и r_{\max} — наименьшее и наибольшее значение коэффициента нормальной анизотропии; s_{Π} — толщина стенки в месте перехода в закругление у дна, мм.

У деталей из анизотропного материала неравномерность по толщине верхнего края в поперечном сечении можно определить по формуле

$$\Delta s_{\Pi} = s_{\text{вн}} - s_{\text{ф}}. \quad (63)$$

Указанные колебания толщины стенки изделия в продольном и поперечном сечениях нельзя отнести к понятию разностенности, так как последняя характеризуется различной толщиной противоположных стенок поперечного сечения — радиальным биением или эксцентрицитетом наружного и внутреннего контуров и вычисляется по формуле

$$\Delta s_{\text{р}} = s_{\text{max}} - s_{\text{min}}. \quad (64)$$

С разностенностью непосредственно связана косина края стакана. Если косина возникает от смещения заготовки, появляется и разностенность. Если появилась разностенность, то обязательно будет косина. Очень редки случаи, когда неравномерность вытяжного зазора (эксцентрицитет рабочих частей штампа) и смещение (эксцентрицитет) заготовки взаимно компенсируются и разностенный стакан не имеет косины края.

В отличие от разностенности величины $\Delta s_{\text{вд}}$, вычисленные по формуле (62), назовем продольной разнотолщинностью, а величину Δs_{Π} — поперечной разнотолщинностью. Параметры $\Delta s_{\text{вд}}$ и Δs_{Π} могут иметь значительную величину и при отсутствии эксцентрицитета внешнего и внутреннего контуров, т. е. при идеальной центрации инструмента ($\Delta s_{\text{р}} = 0$), так как связаны с законами осесимметричной деформации при вытяжке, причем у изотропного материала $\Delta s_{\Pi} = 0$.

У полых изделий с колебаниями размеров по толщине тесно связаны погрешности формы деталей. Погрешности эти разнообразны и чаще всего бывают вызваны анизотропией или неоднородностью свойств заготовки, получающейся, например, в результате неравномерного отжига. Обычно допустимая величина искажения формы задается частью допуска на размер.

Измерения показывают, что в случае анизотропного материала деталь после вытяжки без утонения приобретает по наружному контуру края форму многогранника (четырёхгранника, шестигранника, восьмигранника или просто овала). В данном случае эта некруглость (огранка) количественно может быть оценена как полуразность диаметров наибольшей и наименьшей описанных окружностей в одном поперечном сечении:

$$\Delta_{\text{огр}} = \frac{d_{\text{в max}} - d_{\text{в min}}}{2}, \quad (65)$$

Характеристики погрешностей формы и размеров деталей при вытяжке

| Коэффициент вытяжки m_{d_1} | Относительный зазор $\frac{z}{s_0}$ | Конусообразность $\Delta_{\text{кон}}$, мм | | Огранка $\Delta_{\text{огр}}$, мм | Продольная разнотолщинность $\Delta s_{\text{эд}}$, мм | | Поперечная разнотолщинность $\Delta s_{\text{п}}$, мм |
|-------------------------------|-------------------------------------|---|---------|------------------------------------|---|---------|--|
| | | Фестон | Впадина | | Фестон | Впадина | |
| Латунь Л63, $s_0 = 1,5$ мм | | | | | | | |
| 0,57 | 1,38 | 1,03 | 0,93 | 0,075 | 0,24 | 0,33 | 0,10 |
| | 1,21 | 0,70 | 0,63 | 0,05 | 0,22 | 0,23 | 0,06 |
| | 1,09 | 0,40 | 0,33 | 0,02 | 0,12 | 0,13 | 0,05 |
| | 0,95 | 0,10 | 0,08 | 0,015 | 0,05 | 0,05 | 0,04 |
| | 0,81 | 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| 0,52 | 1,33 | 1,03 | 0,93 | 0,075 | 0,36 | 0,48 | 0,12 |
| | 1,17 | 0,63 | 0,55 | 0,05 | 0,29 | 0,30 | 0,06 |
| | 1,05 | 0,40 | 0,35 | 0,025 | 0,21 | 0,22 | 0,05 |
| | 0,92 | 0,12 | 0,10 | 0,01 | 0,07 | 0,07 | 0,04 |
| | 0,78 | 0,06 | 0,05 | — | — | — | — |
| 0,49 | 1,33 | 1,1 | 0,93 | 0,12 | 0,44 | 0,55 | 0,13 |
| | 1,17 | 0,71 | 0,61 | 0,06 | 0,33 | 0,35 | 0,10 |
| | 1,05 | 0,48 | 0,43 | 0,05 | 0,25 | 0,26 | 0,05 |
| | 0,92 | 0,22 | 0,20 | 0,02 | 0,10 | 0,10 | 0,04 |
| | 0,78 | 0,11 | 0,11 | 0,00 | 0,08 | 0,08 | 0,03 |
| Сталь 08кп, $s_0 = 1,33$ мм | | | | | | | |
| 0,57 | 1,31 | 0,70 | 0,63 | 0,04 | 0,27 | 0,32 | 0,10 |
| | 1,18 | 0,44 | 0,42 | 0,03 | 0,21 | 0,22 | 0,03 |
| | 1,03 | 0,15 | 0,15 | 0,03 | 0,07 | 0,08 | 0,02 |
| | 0,88 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,02 |
| | 0,73 | 0,03 | 0,04 | 0,00 | 0,04 | 0,04 | 0,01 |
| 0,52 | 1,31 | 0,71 | 0,64 | 0,05 | 0,35 | 0,45 | 0,11 |
| | 1,18 | 0,47 | 0,45 | 0,02 | 0,27 | 0,29 | 0,03 |
| | 1,03 | 0,22 | 0,22 | 0,02 | 0,11 | 0,12 | 0,02 |
| | 0,88 | 0,06 | 0,07 | 0,01 | 0,05 | 0,08 | 0,02 |
| | 0,49 | 1,31 | 0,75 | 0,65 | 0,09 | 0,36 | 0,46 |
| 1,18 | | 0,58 | 0,58 | 0,015 | 0,32 | 0,32 | 0,06 |
| 1,03 | | 0,22 | 0,32 | 0,00 | 0,15 | 0,18 | 0,05 |
| 0,88 | | 0,10 | 0,10 | — | 0,05 | 0,05 | 0,04 |

Абсолютная высота фестонов может быть определена при испытании листовых материалов путем пробной вытяжки стаканов по формуле

$$\Delta H = H_{\text{max}} - H_{\text{min}}, \quad (67)$$

где H_{max} и H_{min} — средние значения высоты стакана соответственно по четырем фестонам и четырем впадинам.

где $d_{\text{в max}}$ и $d_{\text{в min}}$ — наибольший и наименьший наружные диаметры по контуру, измеренные вблизи верхнего края стакана в одном сечении.

Максимальный наружный диаметр при вытяжке без утонения располагается по фестонам, минимальный — по впадинам. Это можно объяснить тем, что протяжка утолщений в большей мере уменьшает остаточные напряжения в стенке.

Указанная некруглость (огранка) и конусообразность составляют отклонение формы детали от цилиндрической (или нецилиндрической). Конусообразность поверхности выражается в количественном отношении как погрешность формы продольного сечения:

$$\Delta_{\text{кон}} = d_{\text{в}} - d_{\text{н}}, \quad (66)$$

где $d_{\text{в}}$ и $d_{\text{н}}$ — наибольший и наименьший диаметры наружной поверхности, измеренные соответственно у верхнего края стакана и (внизу) у донного закругления вдоль одного сечения.

Данные табл. 14, где представлены результаты проведенных экспериментов, свидетельствуют об уменьшении всех показателей, характеризующих погрешность формы и размеров изделий при переходе от схемы вытяжки (без утонения) к схеме комбинированной вытяжки. В последнем случае увеличивается чистота поверхности детали. Если поверхность исходного стального листа (после холодной прокатки) имеет 6-й класс чистоты, то после комбинированной вытяжки в зависимости от состояния поверхности вытяжного инструмента и смазки можно получить 9—10-й класс чистоты.

В описанных экспериментах не анализировалось влияние анизотропии на колебания высоты получаемых деталей. Для этой цели были проведены специальные исследования. Данные точности по высоте цилиндрических деталей без фланца, приведенные В. И. Кухтаровым, не учитывают анизотропию материалов, поэтому не пригодны для практического использования. Известно, что при вытяжке без утонения анизотропных материалов высота фестонов составляет 8—15% высоты стакана в зависимости от исходной анизотропии и степени вытяжки (табл. 15). При обрезке края с фестонами приходится удалять значительный припуск еще и потому, что во впадинах между фестонами встречаются либо разглаженные складки, либо продольные трещины, возникающие вследствие значительных тангенциальных деформаций сжатия. При анизотропном материале увеличение припуска на обрезку по сравнению с рекомендуемыми в литературе значениями требует увеличения размеров исходной заготовки. Коэффициент увеличения заготовки, предложенный автором на основе обработки данных практики, связан с величиной фестонов.

Таблица 15

Относительная высота фестонов (степень фестонообразования) при первой вытяжке

| Материал | Толщина листа, мм s_0 | Коэффициент вытяжки m_{d_1} | Относительная высота фестонов Φ , % |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|--|
| Бериллиевая бронза Бр.Б2 | 0,95 | 0,5 | 9,6 |
| | 0,95 | 0,45 | 15,6 |
| Латунь Л63 | 0,5 | 0,5 | 7,9 |
| Сплав АМцА-М | 1,7 | 0,57 | 10,5 |
| Алюминий А1М | 1,5 | 0,5 | 14,5 |
| Сталь 08кп | 0,9 | 0,5 | 7,9 |
| Сталь Х18Н10Т | 1 | 0,5 | 9,4 |

Относительная высота фестонов или степень фестонообразования вычисляется по формуле

$$\Phi = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\min}} \quad (68)$$

Для исследования степени фестонообразования при комбинированной вытяжке использовали образцы из алюминиевого сплава АМцА-М в состоянии поставки и латуни Л63 холоднокатаной со степенью обжатия 40%, толщиной $s_0=1,7$ мм. Опыты проводили при различной величине вытяжных зазоров и различной степени вытяжки.

При величине относительного вытяжного зазора $\frac{z}{s_0} = 2$ обеспечивается вытяжка без протяжки края стенки, т. е. «чистая» вытяжка; другие величины относительного зазора, принятые в опытах, отвечают условиям полукombинированной и комбинированной вытяжки, и, таким образом, принятый диапазон позволяет сопоставить фестонообразование при обычной и комбинированной вытяжке с различным утонением.

Измеренные средние величины высоты фестонов и высоты стаканов по впадинам, а также вычисленные по формуле (68) степени фестонообразования при вытяжке стаканов из указанных материалов с различными коэффициентами деформации даны в табл. 16. Видно, что с уменьшением величины относи-

Таблица 16

Характеристика колебаний высоты деталей при вытяжке анизотропного материала

| Коэффициент вытяжки m_{d_1} | Относительный зазор (коэффициент утонения) $\frac{z}{s_0} (m_{s_1})$ | Высота стакана по впадине H_{\min} , мм | Высота фестонов ΔH , мм | Степень фестонообразования Φ , % |
|-------------------------------|--|---|---------------------------------|---------------------------------------|
| Сплав АМцА-М, $s_0 = 1,7$ мм | | | | |
| 0,60 | 2,00 | 24,20 | 3,55 | 14,7 |
| | 0,88 | 26,40 | 2,17 | 8,2 |
| | 0,80 | 27,54 | 2,08 | 7,5 |
| | 0,74 | 28,85 | 2,54 | 8,8 |
| 0,54 | 2,00 | 30,30 | 6,26 | 20,7 |
| | 0,88 | 34,50 | 4,01 | 11,6 |
| | 0,80 | 36,80 | 3,23 | 8,8 |
| | 0,74 | 38,20 | 4,77 | 12,5 |
| 0,48 | 2,00 | 35,80 | 8,39 | 23,4 |
| | 0,88 | 44,40 | 5,91 | 13,3 |
| | 0,80 | 47,20 | 3,84 | 8,1 |
| | 0,74 | 49,60 | 6,47 | 13,0 |
| Латунь Л63, $s_0=1,7$ мм | | | | |
| 0,60 | 2,00 | 23,65 | 1,18 | 5,0 |
| | 0,88 | 25,90 | 0,73 | 2,7 |
| | 0,80 | 29,60 | 0,59 | 2,0 |
| | 0,74 | 29,92 | 0,73 | 2,4 |
| 0,54 | 2,00 | 30,80 | 3,69 | 12,0 |
| | 0,88 | 35,70 | 2,54 | 7,1 |
| | 0,80 | 38,70 | 2,14 | 5,4 |
| | 0,74 | 39,82 | 2,56 | 6,6 |
| 0,48 | 2,00 | 38,38 | 5,88 | 15,3 |
| | 0,88 | 45,55 | 3,89 | 8,5 |
| | 0,80 | 48,78 | 3,66 | 7,5 |
| | 0,74 | 52,55 | 5,03 | 9,6 |

тельного зазора до $\frac{z}{s_0} = 0,80$ степень фестонообразования уменьшается. Дальнейшее уменьшение зазора приводит к некоторому увеличению степени фестонообразования.

Эту особенность можно объяснить следующим образом. При вытяжке толщина стенки полой детали в пределах впадины больше, чем в пределах фестоны (см. рис. 44), причем зона утолщения распространяется по впадине ниже, чем по фестоны (или произвольное утонение поднимается по фестоны выше, чем по впадине), поэтому при $\frac{z}{s_0} > 0,8$ относительный объем протягиваемого (смещаемого) материала по впадине затрагивает главным образом утолщение, превышает смещаемый объем по фестоны и несколько выравнивает край. Увеличение степени фестонообразования при зазорах $\frac{z}{s_0} \leq 0,8$ связано с принудительным утонением уже по всей высоте стакана. Но и в этом случае степень фестонообразования значительно меньше, чем при $\frac{z}{s_0} > 1$. Уменьшение степени фестонообразования (при $z < s_0$) позволяет сократить расход материала при обрезке изделий.

На основе исследования погрешностей размеров и формы стаканов из анизотропных материалов при различных процессах вытяжки можно сделать следующие выводы:

1. Точность формы и размеров деталей, получаемых комбинированной вытяжкой, по сравнению с вытяжкой (без утонения) значительно возрастает. Например, при $\frac{z}{s_0} \approx 1,35$ отклонения по наружному диаметру латунных стаканов соответствуют примерно полю допусков 8-го класса точности, стальных — полю допусков 7—8-го класса. При больших зазорах точность деталей снижается и не поддается оценке по ГОСТу.

2. При вытяжке с $\frac{z}{s_0} < 0,9$ отклонения по наружному диаметру уменьшаются и у латунных стаканов укладываются в поле допусков 2-го класса точности, у стальных — в поле допусков 2—3-го класса точности.

3. Отклонения по наружным диаметрам являются количественной характеристикой погрешности формы. При вытяжке они превышают предельные отклонения формы (см. табл. 2 по ГОСТу 10356—63), а погрешности формы стаканов, полученных комбинированной вытяжкой, укладываются в VII—X степени точности формы. Учтявая, что указанный ГОСТ составлен для деталей, полученных обработкой резанием (шлифованием), достигнутую при комбинированной вытяжке степень точности формы можно считать весьма высокой.

4. Сравнение наружных диаметров стаканов с диаметрами матриц выявило интересную закономерность (у латуни): при $z > s_0$ отклонения верхнего диаметра изделия имеют знак «плюс», нижнего — «минус»; при $z < s_0$ отклонения обоих диаметров имеют знак «минус». Это еще раз подтверждает, что при вытяжке с зазором, меньшим толщины заготовки, пружинение стенки либо близко к нулю, либо имеет отрицательный знак.

5. Отклонения по толщине стенки у стальных и латунных деталей при вытяжке без утонения соответствовали 8—9-му классу точности.

6. При комбинированной вытяжке колебания толщины соответствовали допускам 2—4-го классов точности, т. е. точность повысилась примерно на 5 классов (это подтверждено также статистической обработкой большого числа измерений).

7. Анизотропия исходного материала сказалась на точности деталей следующим образом.

а) При вытяжке с $z > s_0$:

— наибольшие значения конусообразности располагаются по фестонам;

— наибольшая продольная разнотолщинность наблюдается по впадинам;

— наибольшая поперечная разнотолщинность — у края;

— наибольшее значение имеет степень фестонообразования.

б) При комбинированной вытяжке ($z < s_0$):

— наибольший диаметр края стакана располагается по оси впадин (т. е. здесь наибольшая конусообразность);

— наибольший диаметр края стакана по оси впадин незначительно превышает диаметр края по оси фестонов, т. е. поперечная разнотолщинность у края незначительна;

— степень фестонообразования значительно ниже, чем при вытяжке без утонения.

Общими являются следующие зависимости:

— степень фестонообразования возрастает, а интенсивность ее роста убывает с уменьшением коэффициента вытяжки;

— степень фестонообразования тем меньше, чем меньше исходная анизотропия материала.

2. О ВЫБОРЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫТЯЖКЕ

Исследования технологических параметров метода комбинированной вытяжки выявили, что наиболее рациональным, с точки зрения производительности, является технологический процесс, в основе которого лежат максимальные деформации по периметру заготовки на каждом переходе, а деформации утонения играют вспомогательную, но тем не менее важную роль.

Дело в том, что деформация по периметру (по диаметру) неравноценна деформации утонения (протяжке).

Большие степени деформации по периметру лимитируются главным образом устойчивостью заготовки, определяющей качество изделия и надежность технологии (как известно, имеется два вида потери устойчивости при пластической деформации — продольный изгиб — складкообразование и возникновение шейки — разрыв). Сколько-нибудь существенного отрицательного влияния на стойкость и прочность инструмента деформация по периметру не оказывает ввиду достаточно малых контактных давлений.

Большие же деформации принудительного утонения лимитируются не только целостностью заготовки или потерей ее качества (разностенностью), но и стойкостью (прочностью) деформирующего инструмента.

Контактные давления на инструмент при вытяжке с принудительным утонением достигают значительных величин, чем при вытяжке без утонения, вызывая резкое ухудшение условий трения на рабочих поверхностях инструмента. И хотя на вытяжном пуансоне трение полезно для разгрузки выходного сечения стенки, тяжелые контактные условия вызывают налипание металла и на этой поверхности, что приводит к царапинам и задирам внутри изделий, выходу из строя пуансона. Немалую отрицательную роль в ухудшении контактных условий играет возрастание тепловыделения с увеличением утонения, в результате чего температура на контактной поверхности поднимается выше 100—150°С, вызывая испарение смазки и создавая условия сухого трения.

Эксперименты С. П. Буркина и др. показали, что при протяжке на конической матрице с сухим (несмазанным) пуансоном нормальные контактные давления на матрицу возрастают с увеличением утонения, а при протяжке со смазанным пуансоном снижаются [3].

Увеличение давления металла на стенки матрицы приводит, кроме того, к упругому увеличению ее размеров, что снижает точность вытягиваемой детали.

Изложенное характеризует деформацию утонения как фактор, серьезно влияющий на стойкость инструмента, следовательно, и на надежность, устойчивость технологического процесса. Кроме того, существует определенное значение коэффициента утонения, при котором степень деформации по периметру в комбинированном процессе имеет наибольшую величину. При дальнейшем увеличении степени утонения все показатели комбинированной вытяжки ухудшаются.

В связи с этим при комбинированной вытяжке необходимо стремиться не к максимальному утонению (как это принято при протяжке), а выбирать оптимальные его значения, зависящие от ряда факторов. Рассмотрим некоторые из них.

На первом переходе комбинированной вытяжки значение коэффициента утонения m_{s_1} ограничивается, с одной стороны,

максимальным произвольным утонением стенки вытягиваемой заготовки у дна, с другой — максимальным утолщением края этой стенки.

Исходя из этого можно записать соотношение

$$m_{s_{1\max}} > m_{s_1} > m_{s_{1\min}}, \quad (69)$$

где $m_{s_{1\max}}$ — верхняя граница значения коэффициента утонения, определяемая по формуле (8); $m_{s_{1\min}}$ — нижняя граница значения коэффициента утонения, учитывающая утолщение края стенки.

Минимальное значение коэффициента утонения на первом переходе можно найти из выражения для истинного коэффициента утонения в конечный критический момент комбинированного процесса:

$$m_{s_{1\text{кр}}} = \frac{s_1}{s_{1\text{кр}}} = \frac{m_{s_1}}{\lambda_{\text{кр}}},$$

где $\lambda_{\text{кр}}$ — коэффициент утолщения, определяемый по формуле (10) путем подстановки $m_{d_{1\text{кр}}}$ из формулы (47); $\lambda_{\text{кр}} \approx$

$$\approx \sqrt{\frac{1}{1,25m_{d_1}}}.$$

Отсюда, полагая $m_{s_{1\text{кр}}} = m_{s_{1\text{пред}}}$, найдем

$$m_{s_{1\min}} = \lambda_{\text{кр}} m_{s_{1\text{пред}}} \approx \frac{0,9m_{s_{1\text{пред}}}}{\sqrt{m_{d_1}}}, \quad (70)$$

где $m_{s_{1\text{пред}}}$ определяется по формуле (46) или по графику рис. 21 на основе $m_{d_{1\text{кр}}}$.

Коэффициент $\lambda_{\text{кр}}$ здесь является коэффициентом запаса прочности стенки, так как именно утолщение ограничивает возможности принудительного утонения верхней части стенки при комбинированной вытяжке.

На первом переходе комбинированной вытяжки коэффициент уменьшения периметра можно принимать либо исходя из предельного коэффициента вытяжки на первой стадии [формула (57)], корректируя его с учетом допустимого коэффициента утонения, либо исходя из предельного коэффициента деформации периметра при комбинированном процессе на второй стадии (см. рис. 21).

В любом случае рабочий коэффициент уменьшения периметра можно принимать на основе предельного, учитывая коэффициент запаса, например, по Л. А. Шофману:

$$m_{d_1} = m_{d_{1\text{пред}}} \left(1 + 0,01 \sqrt{\frac{D_0}{s_0}}\right). \quad (71)$$

Учитывая, что фестонобразование при больших степенях деформации по периметру ($m_{d_1} \leq 0,5$) сильно влияет на каче-

ство кромки изделия, целесообразно ввести дополнительный множитель, например,

$$m_{d_1} = \frac{m_{d_{1нпрд}}}{1 - \Phi} \left(1 + 0,01 \sqrt{\frac{D_0}{s_0}} \right), \quad (71')$$

где Φ — степень фестонообразования, определяемая по формуле (68).

На последующем переходе комбинированной вытяжки рабочий коэффициент утонения ограничен соотношением, аналогичным соотношению (69):

$$m_{s_{2max}} > m_{s_2} > m_{s_{2min}}, \quad (72)$$

где $m_{s_{2max}} = \frac{1 - \psi_p}{1 + m_{d_{2г}} - m_{d_2}}$ — при комбинированной вытяжке

с $m_{d_2} > 0,7$;

$m_{s_{2max}} \approx m_{s_{1max}}$ — при комбинированной вытяжке с $m_{d_2} < 0,7$;

$m_{s_{2min}} = \lambda_{2кр} m_{s_{2нпрд}} = \frac{s_2}{s_0}$ — при комбинированной вытяжке из заготовки с неутоненными стенками и без протяжки края;

$$\lambda_{2кр} = \left(\frac{0,8}{m_{d_1}} \right)^f \approx \sqrt{\frac{0,8}{m_{d_1}}};$$

$$m_d = m_{d_1} m_{d_2};$$

$m_{s_{2min}} = \frac{z_1}{s_0} \lambda_{2кр} m_{s_{2нпрд}} = \frac{s_2}{s_0}$ — при комбинированной вытяжке из заготовки с неутоненными стенками, но с протяжкой края на первом переходе; $\lambda_{2г} = \left(\frac{0,8}{m_{d_2}} \right)^f \approx \sqrt{\frac{0,8}{m_{d_2}}}$; $m_{s_{2min}} = \frac{m_{s_{2нпрд}}}{m_{s_1}} = \frac{s_2}{s_1}$ — при комбинированной вытяжке из заготовки с утоненными стенками ($m_{d_1} > 0,7$), полагая, что произвольное утонение дна заготовки компенсируется утолщением на данном переходе;

$$m_{s_{2min}} = \frac{0,9 m_{s_{2нпрд}} \lambda_{2г}}{m_{s_1}} = \frac{s_2}{s_1}$$

— при комбинированной вытяжке из заготовки с утоненными стенками при $m_{d_2} < 0,7$; 0,9 — множитель, учитывающий произвольное утонение дна заготовки; $m_{s_{2нпрд}}$ — предельный коэффициент утонения, находится по формуле (46') с учетом соответствующего коэффициента вытяжки m_{s_2} .

Из выражений для минимального коэффициента утонения при комбинированной вытяжке из заготовки с утоненными стен-

ками следует, что при увеличении утонения на предыдущем переходе необходимо снижать утонение на последующем. С учетом этого можно построить оптимальную технологию комбинированной вытяжки без промежуточных отжигов.

Изложенное позволяет сформулировать принципы выбора коэффициентов деформации при комбинированной вытяжке на первом и последующем переходах.

1. Коэффициенты деформации по периметру (коэффициенты вытяжки) должны быть ближе к предельным с обычным коэффициентом запаса, так как схема комбинированного процесса не ухудшает коэффициента вытяжки.

2. Коэффициенты утонения необходимо выбирать в оптимальных диапазонах на основе предельного коэффициента для данного материала с учетом истинных коэффициентов утонения наиболее толстых участков заготовки.

Таким образом, величины пластической деформации данного листового материала по периметру ($m_{d_{нпрд}}$) и по толщине ($m_{s_{нпрд}}$) четко определяют возможности его использования для глубокой вытяжки. Эти показатели связаны между собой и с основными характеристиками механических свойств различными (иногда противоположными, например, по $r_{ср}$) зависимостями. Установление взаимовлияния этих зависимостей возможно и теоретическими, и экспериментальными методами.

3. МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО ИСПЫТАНИЯ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СПОСОБНОСТЬ ИХ К ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКЕ

Успешное изготовление изделий по экономичной технологии (за минимальное число штамповочных операций) может быть обеспечено лишь при наличии достаточно полной информации о технологических свойствах исходного материала.

Несмотря на разнообразие методов испытания металлов на штампуемость, они не в состоянии охватить все факторы, влияющие на поведение металла при вытяжке. Пока еще нет надежной теории испытания листовых металлов на штампуемость, поэтому в настоящее время считается целесообразным выявлять способность металла к той ли иной штамповочной операции с помощью технологических проб, имитирующих данную операцию [34, 42].

Для листовых материалов способность к глубокой вытяжке регламентируется (ГОСТ 10510—63) глубиной лунки, полученной при испытании по методу Эриксона. Если учесть, что при этом испытании происходит фактически местная формовка по схеме, близкой к двухосному растяжению, а вытяжка предполагает обязательное участие в пластической деформации периферии образца с возникновением тангенциального сжатия,

то показатель штампуемости (глубина лунки), получаемый при этом испытании, может иметь ограниченное значение для практики глубокой вытяжки осесимметричных изделий, составляющих подавляющее большинство номенклатуры полых деталей.

В связи с тем, что развитие производства требует широкого использования методов глубокой вытяжки с принудительным утонением (протяжки, комбинированной вытяжки), необходим метод комплексного испытания листового материала на способность к глубокой вытяжке.

Автором разработан способ определения коэффициента, характеризующего способность листового материала к глубокой вытяжке¹.

Опыт внедрения комбинированной вытяжки показывает, что листовые материалы, имеющие низкую штампуемость, по результатам испытания на выдавливание лунки и на вытяжку стаканов (с $z > s_0$) обнаруживают хорошую способность к вытяжке с принудительным утонением. Мету способности материала деформироваться при совместном и последовательном воздействии процессов деформации по периметру и толщине необходимо определять заранее, чтобы правильно рассчитывать надежный технологический процесс, получать высокую производительность и хорошее качество изделий.

Методика комплексного испытания. Испытание выполняют в три этапа.

I. Определение предельного коэффициента вытяжки.

Условия испытания: вытяжной зазор $z_s = \frac{z}{s_0} \approx 1,3 = \text{const}$;

диаметр образца $D_0 = \text{var}$.

Испытание производят на образцах трех размеров, характеризующихся диапазоном коэффициентов $m_{d_1} = 0,6 \div 0,35$. По результатам испытания строят график максимальное усилие — диаметр образца $P_{\text{max}} - D_0$, на котором по усилию разрыва графически определяют максимальное значение диаметра образца, связанное с предельным коэффициентом соотношением

$$m_{d_{1\text{пред}}} \approx \frac{d_1}{D_{0\text{max}}} \quad (73)$$

На рис. 45 показан такой график, полученный при испытании латуни.

II. Определение предельного коэффициента утонения.

Условия испытания:

а) диаметр образца должен быть близок к максимальному и определяться на основе предельного коэффициента вытяжки,

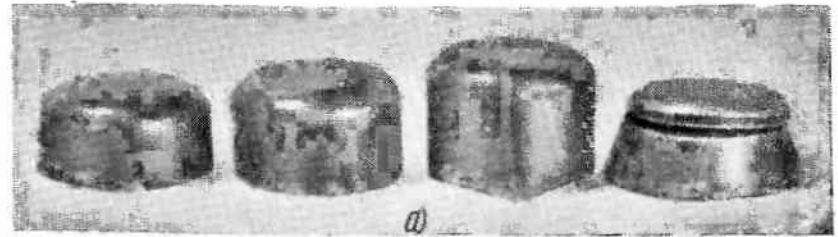
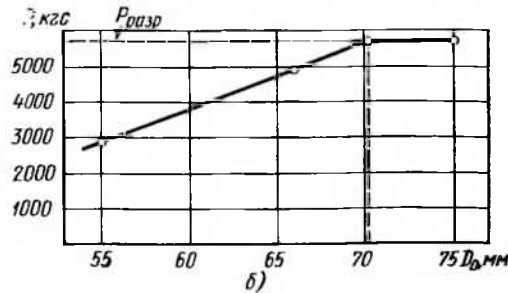


Рис. 45. Результаты испытания листа на предельный коэффициент вытяжки:

а — образцы после испытания; б — график для определения максимального диаметра образца ($D_{0\text{max}} = 71,5$ мм). Материал — латунь Л63; $D_0 = 55; 66; 75$ мм; $d_1 = 33$ мм



полученного на этапе I, и коэффициента запаса по формуле (71) или приближенно

$$D_0 = \frac{d_1}{1,1m_{d_{1\text{пред}}}} \quad (74)$$

б) вытяжной зазор $z_s = \text{var}$.

Испытание производится с вытяжными зазорами $z_s = 0,4 \div 0,8$, начиная с малых значений. Постепенно увеличивают вытяжной зазор ступенями. При получении разрыва в верхней трети стенки образца испытание прекращают и фиксируют две величины: $H_{\text{кр}}$ — глубину образца (стакана) до линии разрыва и $z_{s, \text{min}}$ — относительный зазор в штампе, при котором получен указанный разрыв.

Эти параметры связаны с предельным коэффициентом утонения следующим соотношением для конечного критического момента комбинированной вытяжки:

$$m_{s_{1\text{пред}}} = z_{s_{\text{min}}} (m_{d_{1\text{кр}}})^f = z_{s_{\text{min}}} \times \times \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 4 \frac{H_{\text{кр}} - R_{\text{nc}}}{d_1} z_{s_{\text{min}}} + 2,28 \frac{R_{\text{nc}}}{d_1} - 0,56 \left(\frac{R_{\text{nc}}}{d_1} \right)^2}} \right)^{\frac{1}{1+r_{\text{cp}}}} \quad (75)$$

¹ С. А. Валиев. Способ определения коэффициента, характеризующего способность листового материала к глубокой вытяжке. Авторское свидетельство № 260253, кл. 42к, 37/02, МПК G01п, 1970.

Пренебрегая незначительной погрешностью, формулу (75) можно упростить:

$$m_{s_{1пред}} = z_{s_{мин}} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 4 \frac{H_{кр}}{d_1} z_{s_{мин}}}} \right)^{\frac{1}{1+r_{cp}}} \quad (75')$$

или для изотропного материала

$$m_{s_{1пред}} = z_{s_{мин}} \sqrt{\frac{1}{\sqrt{1 + 4 \frac{H_{кр}}{d_1} z_{s_{мин}}}}} \quad (75'')$$

III. Определение предельной относительной глубины вытяжки.

Условия испытания аналогичны условиям этапа II.

Испытание начинается с использования минимального зазора, полученного на этапе II. Увеличивая вытяжной зазор малыми ступенями (например, по 0,05 мм), испытывают образцы до получения устойчивой вытяжки без разрыва (более 50% образцов). Полученная при этом максимальная глубина стакана, отнесенная к среднему его диаметру (предельная относительная глубина), является критерием способности данного материала к комбинированной глубокой вытяжке.

Максимальная относительная глубина связана с коэффициентами деформации комбинированного процесса:

$$H_{d_{1max}} = \frac{H_{max}}{d_1} = f(m_{d_1}, m_{s_1})^1$$

На рис. 46 показаны образцы и кривые усилие—путь, полученные при испытании на этапах II и III¹.

На этапах I и III целесообразно определять по формуле (68) склонность листа к фестонообразованию (степень фестонообразования).

Испытание по описанной методике является комплексным: оно дает полную характеристику способности листового материала к глубокой вытяжке любым из рассматриваемых методов холодной вытяжки в виде комплекса взаимосвязанных показателей:

$$m_{d_{1пред}}, m_{s_{1пред}}, H_{d_{1max}}$$

Каждый из показателей может быть использован при разработке технологии по соответствующему методу. В частности,

¹ Результат опыта с отрывом дна (см. образец на рис. 46, а) не используется.

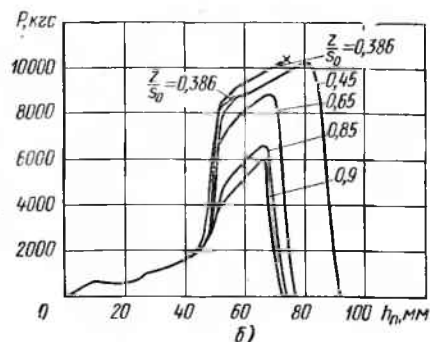


Рис. 46. Результаты испытаний листа на предельный коэффициент утонения:

а — образцы после испытания; б — графики усилие—путь. Материал — латунь Л163; $D_0=80$ мм; $s_0=1,55$ мм

предельный коэффициент утонения, полученный на этапе II и характеризующий условия деформации в конце процесса комбинированной вытяжки, в момент перехода его в процесс протяжки края стенки может быть использован в расчетах технологии протяжки.

Известно, что чем больше средний коэффициент нормальной анизотропии, тем выше способность листа к вытяжке (тем больше значение предельной степени вытяжки). Однако расчеты по формуле (75) показывают, что зависимость способности анизотропного материала к вытяжке с принудительным утонением от коэффициента анизотропии обратная: чем больше значение среднего коэффициента нормальной анизотропии, тем ниже способность листа утоняться (тем больше значение предельного коэффициента утонения).

Количество образцов для каждого этапа испытания принимается в зависимости от требуемой степени достоверности результатов (шесть образцов обеспечивают примерно 85% достоверности результатов опыта).

Метод предназначен для испытания широкого диапазона толщин листовых материалов (0,5—4 мм) с применением складкодержателя или без него и может быть использован для классификации листового металла по способности к глубокой вытяжке на заводах-изготовителях или для испытания на заводах — потребителях листового проката.

4. ШТАМП-ПРИБОР ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИСПЫТАНИЯ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для осуществления комплексного метода испытания листовых материалов автором разработан штамп-прибор (рис. 47, а) с коническим профилем матрицы, позволяющим выявить большую, чем радиальный, способность металла к вытяжке вследствие меньших потерь на трение и изгиб. Угол рабочего конуса матрицы принят, исходя из рекомендаций для вытяжки без утонения и для комбинированной вытяжки, $\alpha = 15^\circ$.

В штампе-приборе использована матрица одного диаметра ($d_m = \text{const}$) и комплект пуансонов с различными диаметрами, с помощью которых изменяется величина вытяжного зазора в зависимости от исходной толщины испытуемого материала или от необходимого утонения стенки стакана. Диаметр вытягиваемых стаканов соответствует обычно принятым (50 или 33 мм).

Штамп (рис. 47, а) работает следующим образом. Плоский образец укладывают на матрицу 4, составленную в соответствии с размерами этого образца, центрируют по диаметру шайбой-фиксатором 7. Затем винтовой складкодержатель 3

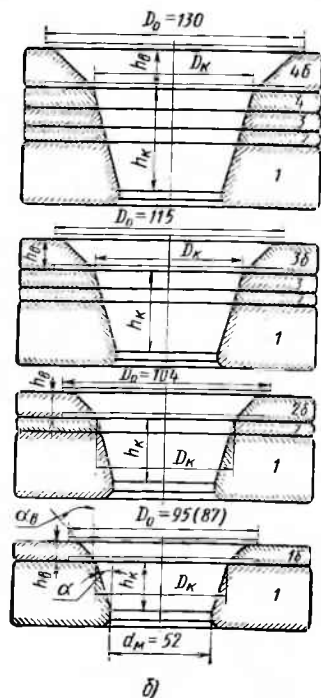
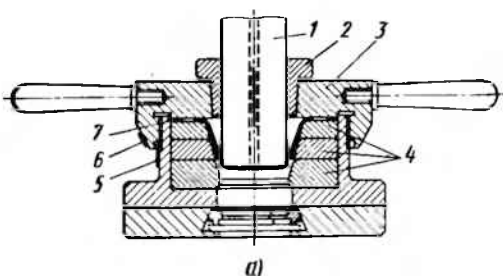


Рис. 47. Штамп-прибор для нового метода испытания листа (а) и варианты составных матриц для образцов различной толщины и диаметра (б)

опускают на образец (в случае его малой относительной толщины) и слегка зажимают для исключения зазоров. По шкалам 5 и 6 контролируют идентичность зазора между матрицей и рабочей поверхностью складкодержателя при испытании образ-

цов одной толщины. Вытяжной пуансон 1, центрируемый во втулке 2, производит вытяжку.

Для фиксирования максимального усилия вытяжки или записи диаграммы штамп-прибор устанавливают на пресс, имеющий указатель усилия, или на универсальную испытательную машину с диаграммным записывающим устройством. Испытание с записью диаграмм усилие—путь дает более полную информацию о материале.

При испытании образцов с большой относительной толщиной, не требующей складкодержателя, центрация пуансона осуществляется так же, но складкодержатель не доходит до образца на расстояние, равное примерно 20 мм; это не препятствует деформации фланца образца.

Оригинальной в штампе-приборе является матрица. Она имеет универсально-сборную составную конструкцию.

Параметры рабочего профиля составных матриц рассчитаны по методике автора для вытяжки со складкодержателем¹ и для вытяжки без складкодержателя². Геометрия матрицы в любом случае обеспечивает четкое разделение вытяжки на две стадии, описанные в гл. II. В основу расчета таких матриц положено условие: поверхность рабочего конуса должна быть равна боковой поверхности конической чашки (или несколько больше ее), в которую превращается плоский образец за первую стадию вытяжки.

В табл. 17 и 18 приведены расчетные параметры составных матриц и их отдельных колец для испытания образцов диаметром $D_0 = 87; 95; 104; 115$ и 130 мм, обеспечивающих на пуансоне диаметром 50 мм значения контрольных коэффициентов вытяжки $m_{d1} = 0,6 \div 0,35$.

Таблица 17

Параметры колец матрицы для испытания образцов с малой относительной толщиной со складкодержателем

| Индекс кольца матрицы (см. рис. 47, б) | Высота конуса кольца h , мм | Высота рабочего конуса матрицы h_K , мм | Входной диаметр рабочего конуса D_K , мм | Диаметр образца D_0 , мм |
|--|-------------------------------|---|--|----------------------------|
| 1 | 25 | 25 | 65,5 | 87; 95 |
| 2 | 7 | 32 | 69 | 104 |
| 3 | 9 | 41 | 74 | 115 |
| 4 | 10 | 51 | 80 | 130 |

¹ С. А. Валиев. Штамп для изготовления полых цилиндрических изделий. Авторское свидетельство № 199079, кл. 7с, 15, 1967.

² С. А. Валиев. Штамп для изготовления полых цилиндрических изделий. Авторское свидетельство № 241386, кл. 7с, 15, 1969.

Таблица 18

Параметры верхних колец матрицы для испытания образцов с большой относительной толщиной

| Индекс кольца матрицы (см. рис. 47, б) | Высота конуса кольца H_B , мм | Диаметр кольца | | Диаметр образца D_0 , мм |
|--|---------------------------------|--------------------|------------------------|----------------------------|
| | | верхний D_H , мм | нижний $\sim D_K$, мм | |
| 1 б | 9,3 | 85 | 65,5 | 87; 95 |
| 2 б | 13 | 95 | 69 | 104 |
| 3 б | 15,5 | 105 | 74 | 115 |
| 4 б | 20 | 120 | 80 | 130 |

На рис. 47, б показаны сборные матрицы для указанных контрольных диаметров образцов, каждая для случая вытяжки без складкодержателя с верхним кольцом, имеющим индекс «б» — двухконусный профиль, и для случая вытяжки со складкодержателем — одноконусный профиль. Параметры матриц соответствуют данным табл. 17 и 18. Таким образом, из восьми колец можно составить восемь матриц с рациональными рабочими профилями, обеспечивающими высокую идентичность условий испытания.

В зависимости от специфики производства (детали с большими закруглениями у дна) испытание можно проводить с помощью пуансона со сферическим торцом. При таком опыте выявляется картина поведения листа при вытяжке со значительным двухосным растяжением.

Некоторые результаты экспериментальной проверки изложенного метода приведены в табл. 19. Здесь для сравнения представлены относительные зазоры $\frac{z}{s_0}$, по величине равные условным (номинальным) коэффициентам утонения (m_{s1}), и коэффициенты утонения $m_{ск}$, учитывающие максимальное (расчетное) утолщение края заготовки. Здесь же приведены значения предельных коэффициентов утонения, вычисленные по формуле (75") без учета анизотропии материала на основе экспериментально полученных значений критической относительной глубины $\frac{H_{кр}}{d_1}$.

Наличие в таблице значений истинных коэффициентов утонения, меньших, чем предельные, и не вызвавших разрыва образцов, можно объяснить отклонением утолщения края от расчетного в меньшую сторону под влиянием различных неучтенных факторов (анизотропия, изгиб, трение и т. п.), а также тем, что утонение самой кромки заготовки происходит при уменьшающемся объеме материала в зоне II и к разрыву обычно не приводит.

Таблица 19

Результаты экспериментальной проверки метода определения предельных коэффициентов утонения при комбинированной вытяжке (этап II)

| Материалы и размеры образцов | Коэффициент вытяжки m_{d1} | Номинальный коэффициент утонения $m_{s1} \left(\frac{z}{\epsilon_0} \right)$ | Коэффициент утонения края $m_{ск}$ | Степень деформации | | Максимальное усилие P , кгс | Предельный коэффициент $m_{спред}$ |
|--|------------------------------|---|------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| | | | | номинальная Ψ_k , % | с учетом толщины края $\Psi_{кр}$, % | | |
| Сталь 10 $D_0 = 80$ мм $s_0 = 2,6$ мм | 0,596 | 0,83 | 0,686 | 47 | 59 | 9 800 | 0,40 |
| | 0,603 | 0,65 | 0,505 | 61 | 69 | 13 750 | |
| | 0,610 | 0,51 | 0,398 | 69 | 76 | 15 850 | |
| | 0,610 | 0,48 | 0,375 | 71 | 77 | 16 700 (разрыв стенки) | |
| Сталь 10 $D_0 = 90$ мм $s_0 = 2,6$ мм | 0,530 | 0,89 | 0,645 | 52 | 66 | 10 660 | 0,408 |
| | 0,536 | 0,65 | 0,475 | 65 | 74 | 15 960 | |
| | 0,54 | 0,524 | 0,382 | 72 | 79 | 17 550 | |
| | 0,54 | 0,51 | 0,375 | 73 | 80 | 16 750 (разрыв стенки) | |
| Сталь 10 $D_0 = 100$ мм $s_0 = 2,6$ мм | 0,477 | 0,89 | 0,615 | 57 | 71 | 12 450 | 0,412 |
| | 0,483 | 0,65 | 0,45 | 68 | 78 | 16 350 | |
| | 0,486 | 0,54 | 0,377 | 74 | 82 | 17 600 (разрыв стенки) | |
| | 0,486 | 0,524 | 0,366 | 74 | 82 | 16 400 (разрыв стенки) | |
| Латунь Л63 $D_0 = 80$ мм $s_0 = 1,55$ мм | 0,61 | 0,90 | 0,7 | 45 | 57 | 6 020 | 0,34 |
| | 0,61 | 0,85 | 0,66 | 48 | 60 | 6 550 | |
| | 0,61 | 0,65 | 0,506 | 60 | 69 | 8 850 | |
| | 0,62 | 0,45 | 0,354 | 72 | 78 | 10 250 | |
| | 0,62 | 0,386 | 0,305 | 76 | 81 | 9 650 (разрыв стенки) | |
| | | | | | | | |

| Материалы и размеры образцов | Коэффициент вытяжки m_{d1} | Номинальный коэффициент утонения $m_{s1} \left(\frac{z}{s_0} \right)$ | Коэффициент утонения края m_{sk} | Степень деформации | | Максимальное усилие P , кгс | Предельный коэффициент $m_{спред}$ |
|---|------------------------------|--|------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|--|------------------------------------|
| | | | | номинальная ψ_k , % | с учетом толщины края $\psi_{кр}$, % | | |
| Латунь Л63 $D_0 = 90$ мм $s_0 = 1,63$ мм | 0,54 | 0,92 | 0,676 | 50 | 63 | 6 750 | 0,36 |
| | 0,54 | 0,81 | 0,595 | 56 | 68 | 8 350 | |
| | 0,54 | 0,77 | 0,565 | 58 | 69 | 9 350 | |
| | 0,544 | 0,61 | 0,45 | 67 | 75 | 10 900 | |
| | 0,55 | 0,43 | 0,32 | 76 | 82 | 11 350 | |
| | 0,55 | 0,37 | — | 79 | — | (разрыв стенки) 10 000 (отрыв дна) | |
| Алюминий А1 $D_0 = 80$ мм $s_0 = 0,94$ мм | 0,615 | 0,74 | 0,58 | 55 | 64 | 1400 | 0,36 |
| | 0,618 | 0,63 | 0,485 | 61 | 70 | 1610 | |
| | 0,618 | 0,585 | 0,46 | 64 | 72 | 1650 | |
| | 0,620 | 0,420 | 0,33 | 74 | 79 | 1900 | |
| | 0,620 | 0,42 | 0,33 | 74 | 79,5 | 1510 | |
| | — | — | — | — | — | (разрыв стенки) | |
| Алюминий А1 $D_0 = 90$ мм $s_0 = 0,94$ мм | 0,548 | 0,74 | 0,550 | 59 | 70 | 1610 | 0,366 |
| | 0,55 | 0,63 | 0,466 | 65 | 74 | 1700 | |
| | 0,55 | 0,585 | 0,434 | 69 | 76 | 1800 | |
| | 0,55 | 0,48 | 0,356 | 74 | 80 | 1920 | |
| | 0,55 | 0,42 | 0,31 | 77 | 83 | 1450 | |
| — | — | — | — | — | (разрыв стенки) | | |

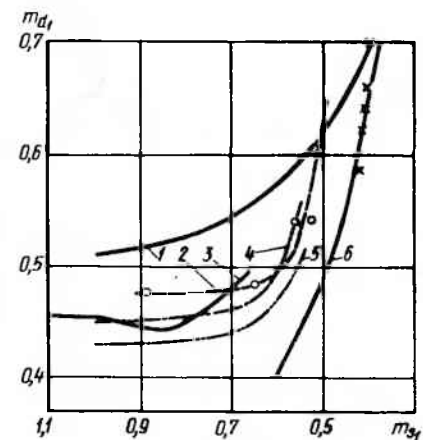


Рис. 48. Расчетные и экспериментальные зависимости между коэффициентом вытяжки и коэффициентом утонения:

1 — по данным работы [1]; 2 — по опытам автора с непереломными значениями m_{d1} (O — вытяжка без разрушения; X — разрыв стенки); 3 — по данным работы [51]; 4, 5 — по данным работы Б. Н. Любарского, для $\alpha=20^\circ$ и $\alpha=15^\circ$; 6 — теоретическая — по формуле (46); материал — низкоуглеродистая сталь; $\psi_p=0,2$

по формуле (46), что свидетельствует о достоверности результатов, полученных при новом методе испытаний.

5. ОБОБЩЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ

Теоретический анализ и экспериментальные исследования различных процессов глубокой вытяжки позволяют помимо основных понятий — процесс деформации, схема деформации, метод (способ) вытяжки, переход (операция), ввести новое понятие — технологическая система.

Методы вытяжки можно рассматривать как технологические системы, представляющие собой последовательное сочетание отдельных элементов-операций.

Если условно обозначить элементы-операции, соответствующие трем основным процессам вытяжки, следующими буквами: *V* — вытяжка (без утонения), *П* — протяжка, *K* — комбинированная вытяжка, то обычную технологию вытяжки можно представить как систему, состоящую из элементов *V*: *V—V—V—V...*

Например, технологический процесс изготовления трубок — заготовок для сильфонов [4] является системой из элементов *V* и *П* (всего 12 элементов-операций): *V—V—V—V—V—V—П—П—П—П—П—П*.

Подобные громоздкие системы, широко применяемые в промышленности, свидетельствуют о большой трудоемкости технологии глубокой вытяжки.

На основе указанных на рис. 3 процессов деформации вытяжки и соответствующих им методов вытяжки разработана общая классификация технологических систем глубокой вытяжки, представленная на рис. 49 в виде структурной таблицы.

В этой классификации технологические системы охватывают все возможные сочетания процессов вытяжки на первой и вто-

На рис. 48 для сопоставления приведены экспериментальные данные различных исследователей о связи коэффициентов деформации m_{d1} и m_{s1} между собой. Результаты экспериментов согласуются между собой, заметны большие возможности конических матриц как по утонению, так и по деформации периметра (кривая 5) по сравнению с радиальными (кривая 3). Предельные коэффициенты утонения, полученные автором при испытаниях заготовок из стали ($\psi_p=0,2$), удовлетворительно согласуются с теоретической кривой $m_{s1пред} = f(m_{d1})$, построенной

Достижимые значения относительной глубины и степени деформации в различных технологических системах

| № по пор. | Шифр системы | Первая операция | | | | Вторая операция | | | | m_{S_2} | $\Psi_{1,2} \cdot \%$ |
|-----------|--------------|-----------------|-----------|--------------|-------------------|-----------------|-----------|--------------|-------------------|-----------|-----------------------|
| | | m_{d_1} | m_{S_1} | $\Psi_1, \%$ | $\frac{H_1}{d_1}$ | m_{d_2} | m_{S_2} | $\Psi_2, \%$ | $\frac{H_2}{d_2}$ | | |
| 1 | $B-B$ | 0,44 | 1,0 | 56 | 1,08 | 0,75 | 1 | 25 | 2,05 | 1 | 67 |
| 2 | $B-P_1$ | 0,44 | 1,0 | 56 | 1,08 | 1,0 | 0,6 | 40 | 1,73 | 0,6 | 73,5 |
| 3 | $B-P_2$ | 0,44 | 1,0 | 56 | 1,08 | 1 | 0,36 | 64 | 2,9 | 0,36 | 84 |
| 4 | $B-K_1$ | 0,44 | 1,0 | 56 | 1,08 | 0,75 | 0,7 | 47,5 | 2,9 | 0,7 | 77 |
| 5 | $B-K_2$ | 0,44 | 1,0 | 56 | 1,08 | 0,75 | 0,42 | 68,5 | 4,8 | 0,42 | 86 |
| 6 | K_1-K_1 | 0,44 | 0,6 | 73,6 | 1,75 | 0,75 | 0,70 | 47,5 | 4,8 | 0,42 | 86 |
| 7 | K_1-K_2 | 0,44 | 0,6 | 73,6 | 1,75 | 0,75 | 0,42 | 69,5 | 8,1 | 0,25 | 92 |
| 8 | K_1-P_1 | 0,44 | 0,6 | 73,6 | 1,75 | 1,0 | 0,6 | 40 | 2,9 | 0,36 | 84 |
| 9 | K_1-P_2 | 0,44 | 0,6 | 73,6 | 1,75 | 1,0 | 0,36 | 64 | 4,8 | 0,22 | 90,5 |
| 10 | K_1-B_1 | 0,44 | 0,6 | 73,6 | 1,75 | 0,55 | 1,0 | 45 | 7,6 | 0,60 | 85,5 |
| 11 | K_1-B_2 | 0,44 | 0,6 | 73,6 | 1,75 | 0,55 | 0,6 | 67 | 12,7 | 0,36 | 91,3 |
| 12 | K_2-K_1 | 0,44 | 0,42 | 81,5 | 2,5 | 0,75 | 1,1 | 25 | 4,5 | 0,42 | 86 |
| 13 | K_2-K_2 | 0,44 | 0,42 | 81,5 | 2,5 | 0,75 | 0,66 | 50,5 | 7,4 | 0,28 | 91 |
| 14 | K_2-P_1 | 0,44 | 0,42 | 81,5 | 2,5 | 1,0 | 0,60 | 40 | 4,2 | 0,25 | 89 |
| 15 | K_2-P_2 | 0,44 | 0,42 | 81,5 | 2,5 | 1,0 | 0,36 | 64 | 7,0 | 0,15 | 93,4 |
| 16 | K_2-B_1 | 0,44 | 0,42 | 81,5 | 2,5 | 0,55 | 1,3 | 45 | 10,6 | 0,42 | 90 |
| 17 | K_2-B_2 | 0,44 | 0,42 | 81,5 | 2,5 | 0,55 | 0,78 | 57 | 13,5 | 0,33 | 92 |
| 18 | P_1-P_1 | 0,9 | 0,5 | 55 | 0,12 | 0,9 | 0,6 | 46 | 0,44 | 0,30 | 75,6 |
| 19 | P_1-P_2 | 0,9 | 0,5 | 55 | 0,12 | 0,9 | 0,36 | 67,5 | 0,73 | 0,18 | 85,4 |
| 20 | P_1-K_1 | 0,9 | 0,5 | 55 | 0,12 | 0,75 | 0,92 | 31 | 0,65 | 0,46 | 69 |
| 21 | P_1-K_2 | 0,9 | 0,5 | 55 | 0,12 | 0,75 | 0,55 | 59 | 1,1 | 0,27 | 81,5 |
| 22 | P_1-B_1 | 0,9 | 0,5 | 55 | 0,12 | 0,6 | 1,0 | 40 | 1,2 | 0,5 | 73 |
| 23 | P_1-B_2 | 0,9 | 0,5 | 55 | 0,12 | 0,6 | 0,6 | 64 | 2,0 | 0,30 | 84 |
| 24 | P_2-P_1 | 0,9 | 0,4 | 64 | 0,15 | 0,9 | 0,6 | 46 | 0,55 | 0,24 | 80,5 |
| 25 | P_2-P_2 | 0,9 | 0,4 | 64 | 0,15 | 0,9 | 0,36 | 67,5 | 0,92 | 0,15 | 88,5 |
| 26 | P_2-K_1 | 0,9 | 0,4 | 64 | 0,15 | 0,75 | 1,1 | 25 | 0,75 | 0,4 | 73 |
| 27 | P_2-K_2 | 0,9 | 0,4 | 64 | 0,15 | 0,75 | 0,66 | 50 | 1,25 | 0,26 | 82 |
| 28 | P_2-B_1 | 0,9 | 0,4 | 64 | 0,15 | 0,6 | 1,0 | 40 | 1,50 | 0,4 | 78,4 |
| 29 | P_2-B_2 | 0,9 | 0,4 | 64 | 0,15 | 0,6 | 0,6 | 64 | 2,5 | 0,24 | 87 |

рой операциях, т. е. представляют собой двухэлементные системы.

Двухэлементные системы являются основными. Они обеспечивают высокопроизводительную технологию получения полых изделий в большом диапазоне относительных параметров (H_d , K_T).

Цифровые индексы при буквенных символах указывают количество матриц, через которые деформируются заготовки. Обозначение B_1 соответствует комбинированной вытяжке по новому способу (без утонения стенки).

Элементы с индексом «2» фактически представляют собой составные элементы, собранные из простых элементов, или подсистемы, например, $P_2 = P_1 + P_1$; $K_2 = K_1 + P_1$; $B_2 = B_1 + P_1$.

Выбор необходимой, оптимальной для данных условий системы может быть облегчен благодаря расшифровке достижимых значений технологических параметров систем, приведенных в

Рис. 49. Общая классификация технологических систем глубокой вытяжки

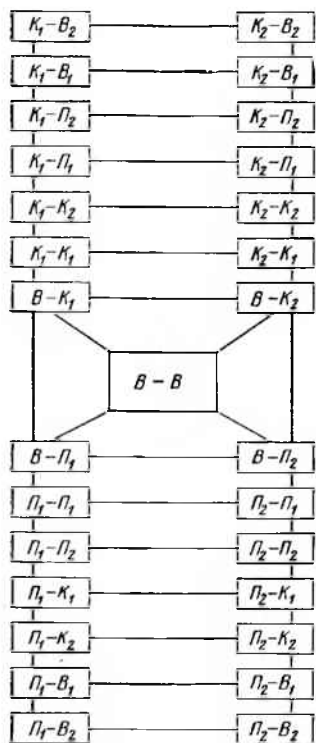


табл. 20. В основу расчета были положены минимальные значения рабочих коэффициентов вытяжки ($m_{d_1} = 0,44$) на первой операции и минимальные значения расчетных коэффициентов утонения. Данные, приведенные в таблице, показывают, что эти системы могут обеспечить относительную глубину вытяжки в диапазоне $H_d = 0,2 \div 13,5$ и отношение толщины дна к толщине стенки $K_T = 1 \div 6$.

Явное преимущество по основному показателю (H_d), характеризующему производительность технологического процесса, имеют системы с элементом комбинированной вытяжки (K_1 , K_2 , B_1 , B_2). Если необходимо получить более глубокие детали, то любую из двухэлементных систем можно развить в многоэлементную путем добавления последующих элементов. При этом могут быть простые сочетания, когда последующие элементы операции аналогичны второму элементу (например, $K_1-K_2-K_2$), и сложные сочетания, когда последующие элементы отличаются от второго ($K_1-K_2-B_2$).

В частности, по технологической системе 17 с добавлением третьего элемента — операции $K_2-B_2-B_2$ можно получить $H_d \approx 40$ при $K_T = 3$.

Системы 18—29 с первой операцией протяжки не имеют эффективного значения там, где необходимо получить изделие большой глубины за минимальное число операций. Эти системы целесообразно применять, когда необходимо получить большой перепад между толщиной стенки и толщиной дна при небольшой глубине. При этом заготовка должна иметь большую исходную толщину при небольшом превышении ее диаметра над диаметром готового изделия.

Достижимые значения относительной глубины вытяжки связаны с потребным числом переходов деформации по пери-

метру n_d и по толщине n_s следующей приближенной зависимостью:

$$H_d = \frac{0,25}{m_s} \left[\left(\frac{1}{m_{d1} m_{di}^{n_d-1}} \right)^2 - 1 \right]. \quad (76)$$

Результаты расчетов по этой формуле применительно к обычному ($m_{d1} = 0,44$; $m_{di} = 0,75$) и новому ($m_{d1} = 0,44$; $m_{di} = 0,55$) методам комбинированной вытяжки представлены в виде номограммы (рис. 50). Номограмма имеет шкалы суммарного коэффициента утонения m_s , степени тонкостенности K_T и две шкалы

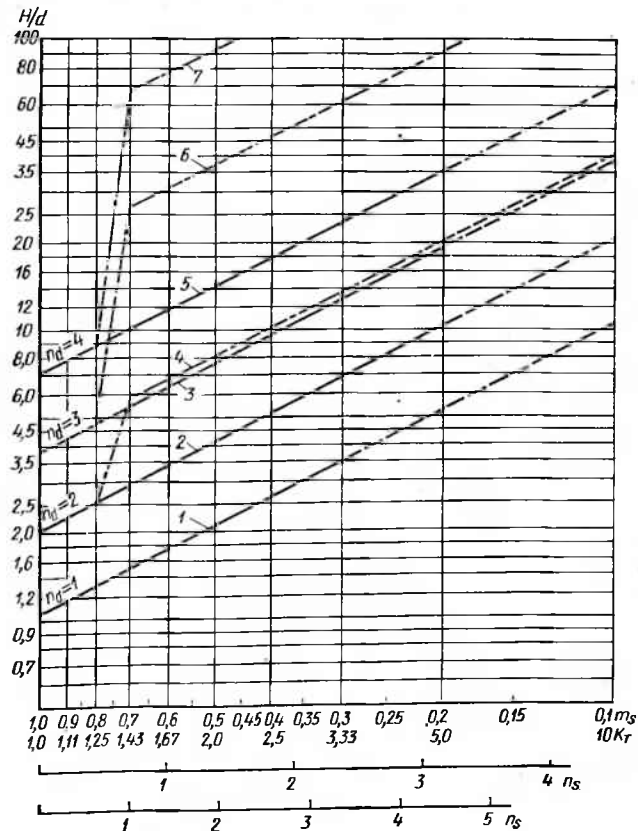


Рис. 50. Номограмма для определения оптимального значения суммарного коэффициента утонения по оптимальной глубине изделия:

1 — $K_1(2)$; 2 — системы $K_1(2) - K_1(2)$; 3 — $K_1(2) - K_1(2) - K_2$; 4 — $K_1(2) - B_1(2)$; 5 — $K_1(2) - K_1(2) - K_2 - K_3$; 6 — $K_1(2) - B_1(2) - B_1(2)$; 7 — $K_1(2) - B_1(2) - B_1(2) - B_1(2)$. Продолжение линий (штриховые) соответствует добавлению к основной системе дополнительного элемента типа $P_1(2)$

чисел переходов по утонению n_s (соответственно для $m_{si} = 0,6$ и $m_{si} = 0,7$) По номограмме можно выбрать оптимальную технологическую систему, обеспечивающую минимальное число операций при минимальном расходе материала.

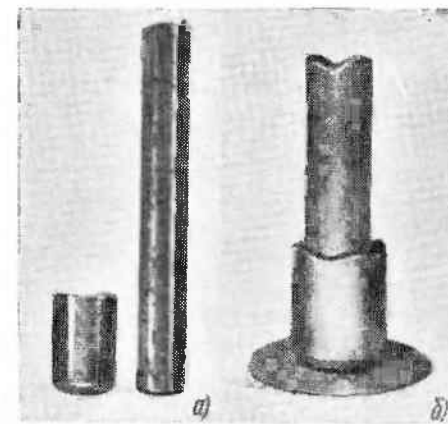


Рис. 51. Примеры двухоперационной технологии комбинированной вытяжки:

а — футляра авторучки (латунь), б — стального корпуса

Изложенное показывает, что разработанная общая классификация технологических систем позволяет на основе типовых элементов операций строить (собирать) оптимальные технологические процессы с минимальным циклом изготовления из листового материала полых изделий практически любой относительной глубины при любом масштабе производства.

Общая классификация технологических методов и систем включает и ныне действующие процессы, и процессы, которые еще детально не разработаны.

Разумеется, описанные технологические системы глубокой вытяжки не исключают возможности использования для получения конкретных разновидностей деталей в качестве дополнительных (предварительных, промежуточных или завершающих) элементов операций неродственных вытяжке методов, например, раскатки, обжима, раздачи, объемной штамповки (осадка, выдавливание) и т. п.

На рис. 51 представлены результаты использования двухэлементных технологических систем при изготовлении производственных изделий из различных материалов.

Глава V. ОБЩАЯ МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫТЯЖКИ

1. О ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ

Деталь, предназначенная для изготовления методом комбинированной вытяжки, должна удовлетворять возможностям и особенностям этой технологии, т. е. быть технологичной. Под технологичностью, как известно, понимается такое сочетание элементов конструкции детали, которое обеспечивает наиболее экономичное ее изготовление и высокое качество.

Как отмечалось, комбинированная вытяжка обеспечивает такую же высокую точность по диаметру и толщине, как и протяжка. Она на 2—3 класса выше, чем точность вытяжки без утонения. Поскольку стенка, утоненная при комбинированной вытяжке по всей длине образующей детали, имеет более высокое качество, жесткость и прочность, чем при вытяжке, то во многих случаях можно предусматривать у полых изделий стенку более тонкую, чем толщина исходного листа. Это способствует значительному сокращению нормы расхода материала и повышает технологичность изделия.

Таким образом, основным признаком технологичности детали для комбинированной вытяжки является толщина стенки, меньшая, чем толщина исходного материала. Необходимо учитывать, что если при протяжке толщина дна имеет толщину исходного материала или даже несколько увеличивается, то при комбинированной вытяжке толщина дна либо сохраняется, либо несколько уменьшается (растягивается).

Наиболее удачной, с точки зрения технологичности, следует считать деталь, в чертеже которой конструктором задана толщина исходного листа (дна), а выбор толщины стенки представлен технологю. Это позволяет создать наиболее экономичный вариант технологического процесса как по количеству переходов вытяжки, так и по расходу материала.

Если же в чертеже толщина стенки и исходного листа указана, то технологичной следует признать деталь со степенью тонкостенности в диапазоне $K_T=1,3\div 4$ (т. е. с суммарным ко-

эффициентом утонения $m_s=0,75\div 0,25$), причем большие значения K_T соответствуют большей H_d . Повышается технологичность и в том случае, если один из указанных параметров (толщина дна или стенки) задается в некотором диапазоне.

Весьма технологичными являются также детали без дна (типа трубок). В некоторых отраслях промышленности они составляют значительную часть номенклатуры тонкостенных деталей (например, корпуса конденсаторов, трубки для сильфонов).

Комбинированной вытяжкой можно получить детали со стенками толщиной, равномерной по длине, уменьшающейся к краю, или с внутренними ступеньками [21]; детали, форма которых (в плане) круг, квадрат, прямоугольник, эллипс и т. п., а также детали с двойными стенками различной толщины. Детали с плоским фланцем могут быть получены с толщиной фланца, примерно равной толщине исходного материала, или с меньшей, но радиус перехода стенки во фланец должен быть достаточно большим, так как этот параметр ограничивает достижимые степени деформации. Более приемлема коническая форма фланца, который может сопрягаться со стенкой малым радиусом.

Радиус перехода стенки детали в дно практически может быть любой, а минимальное значение его может быть $r\leq 0,5 s_0$ (см. рис. 14).

Комбинированная вытяжка позволяет получать многослойные детали из одного или разных материалов с высокой точностью стенок и плотной посадкой слоев, достигаемой в процессе утонения.

Максимальная относительная глубина детали, которая может быть получена при наиболее экономичном технологическом процессе комбинированной вытяжки, намного превосходит встречающиеся в практике. Таким образом, этот параметр детали не является лимитирующим. На рис. 52 показаны типы деталей более технологичных для комбини-

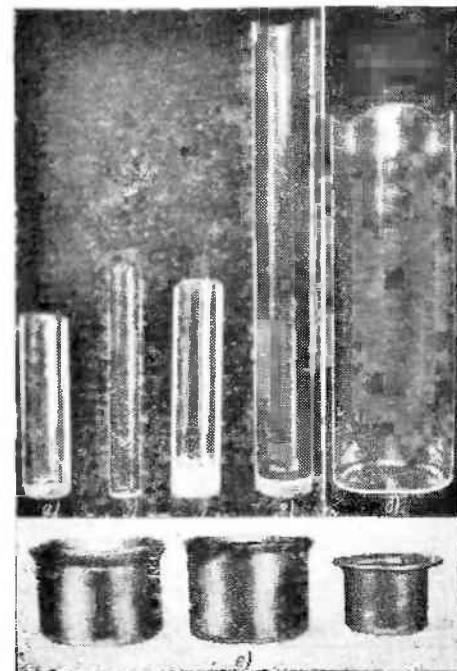


Рис. 52. Некоторые типы полых деталей, получаемых комбинированной вытяжкой из алюминия, стали и латуни

рованной вытяжки (*a, б, д, е*) и более технологичных для протяжки (*в, г*).

2. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИИ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫТЯЖКИ

При выборе оптимального варианта технологии глубокой вытяжки основными критериями являются следующие составные элементы себестоимости изделий: стоимость материала и трудоемкость.

Меньшее значение при крупносерийном производстве имеет третья составляющая себестоимости — расходы на инструмент (штампы).

Выбирать оптимальный вариант технологического процесса можно на основании себестоимости детали, подсчитанной, например, по формуле [20]

$$C = C_m + \sum C_{\text{оп}} \left(1 + \frac{H_d}{100}\right) + \sum \frac{C_{\text{шт}} \left(1 + \frac{H_{\text{шт}}}{100}\right)}{P}, \quad (77)$$

где C_m — стоимость материала на одну деталь;

$C_{\text{оп}}$ — заработная плата на каждую из операций, составляющих технологический процесс;

H_d — накладные расходы (в %) по цеху, где изготавливается деталь;

$C_{\text{шт}}$ — стоимость штампа для каждой операции;

$H_{\text{шт}}$ — накладные расходы (в %) по цеху, где изготавливаются штампы;

P — величина партии изготавливаемых деталей до полного износа штампа.

Стоимость материала можно уменьшить путем выбора недорогого исходного материала и минимального его расхода, а трудоемкость — в основном путем сокращения числа операций. Специфика глубокой вытяжки (и комбинированной в особенности) связывает эти две составляющие себестоимости сложной зависимостью.

Как отмечалось, для создания оптимального варианта технологии глубокой вытяжки необходимо, чтобы конструкция полой детали была технологичной. Если конструкция позволяет варьировать толщину стенки или исходного материала (или оба параметра), можно применить наиболее прогрессивные методы, например, метод комбинированной вытяжки. Комбинированная вытяжка в сравнении с традиционными методами позволяет решить проблему сокращения числа операций однозначно — обеспечивает их уменьшение.

При сокращении числа операций вытяжки (и вспомогательных операций) уменьшается величина и третьей составляющей

себестоимости штампованной детали — расходов на штампы.

Но варьирование толщины стенки изделия или толщины исходного материала влияет на норму расхода материала, поэтому, рассматривая технологический процесс, необходимо проводить сравнительный анализ нормы расхода материала и коэффициентов деформации комплексно. Величины последних определяют трудоемкость технологии.

Для приближенных сравнительных расчетов расхода материала при вытяжке и комбинированной вытяжке можно пользоваться формулой идеальной нормы расхода (без учета конечных потерь)

$$N = \rho_m D_0^2 (1 + 1,5s_D)^2 s_0, \quad (78)$$

где ρ_m — плотность материала, г/см³.

Теоретически возможны следующие варианты применения комбинированной вытяжки.

Вариант А. В чертеже детали задано постоянное значение толщины дна s_0 (исходного материала). Толщину стенки можно выбирать меньше толщины исходного материала в некотором диапазоне. В этом случае чем меньше значение суммарного коэффициента утонения, тем меньше расход материала и больше число переходов по утонению.

По номограмме (см. рис. 50) на основе относительной глубины $\frac{H}{d}$ определяем оптимальную величину суммарного коэффициента утонения, обеспечивающую небольшое число операций (n_d и n_s).

При пользовании номограммой необходимо также учитывать возможности сокращения n_s применением комбинированной вытяжки и протяжки через две матрицы и сокращения n_d применением комбинированной вытяжки по новому методу ($c_{m_{d_i}} = 0,55 \div 0,65$).

По суммарному коэффициенту утонения определяем толщину стенки детали $s = s_0 m_s$.

Вариант Б. В чертеже детали задано постоянное значение толщины стенки s . Толщину исходного материала можно выбирать большей. Однако чем она больше, тем больше расход материала и больше число переходов по утонению (n_s).

По той же номограмме (см. рис. 50) на основе $\frac{H}{d}$ выбираем малое значение степени тонкостенности K_T (с целью экономии материала) и находим $s_0 = s K_T$. Если нужно сократить число переходов n_d , предпочтительнее использовать новый метод комбинированной вытяжки (на рисунке штрих-пунктирные линии), который требует небольшого утонения (достаточно $m_s \approx 0,7$ или $K_T \approx 1,35 \div 1,45$).

Вариант В. Задано: уменьшать толщину стенки и увеличивать толщину дна в некотором диапазоне от принятой в чертеже одинаковой толщины стенки и дна s .

Принимая постоянным значение толщины исходного материала (дна) или стенки, эту задачу можно свести к случаям А или Б соответственно. Но если есть дополнительное условие сохранения нормы расхода материала, равной норме расхода при вытяжке, то, принимая небольшую степень тонкостенности ($K_T < 2$), получаем толщину исходного материала $s_0 = sK_T$, а коэффициент утонения, обеспечивающий сохранение идеальной нормы расхода материала, вычисляем по формуле

$$m_s = \frac{4 \frac{H}{d} + 1 - K_T W}{4 \frac{H}{d} K_T W}, \quad (79)$$

где W — коэффициент, равный $\sim 1,1$ (для однорядного раскроя).

Суммарный коэффициент, меньший значения, рассчитанного по формуле (79), будет обеспечивать снижение нормы расхода материала при данных значениях W и K_T .

В реальных условиях действительная норма расхода материала может отклоняться от идеальной в ту или другую сторону под влиянием некратностей при раскрое материала. Вероятность отклонений здесь такая же, как и при любом раскрое, не связанном со спецификой комбинированной вытяжки.

Помимо рассмотренных вариантов применения комбинированной вытяжки реален еще один вариант (Г), не связанный с изменением нормы расхода материала.

Вариант Г. В чертеже заданы постоянные значения толщины стенки s и толщины исходного материала s_0 , причем $s_0 > s$.

Суммарный коэффициент утонения в этом случае определяют по номинальным значениям толщины стенки и материала:

$$m_s = \frac{s}{s_0}. \quad (80)$$

Изложенное показывает, что вариант А (переход на комбинированную вытяжку с сохранением толщины исходного материала, применяемого при вытяжке) является наиболее экономически эффективным. При нем сокращаются затраты по всем статьям структуры себестоимости: по стоимости материала, трудозатратам и расходам на инструмент.

При варианте Б увеличение нормы расхода тем меньше, чем больше H_d , но в любом случае это увеличение мало, так как чаще всего поверхность дна значительно меньше боковой поверхности.

Необходимо отметить, что применение комбинированной вытяжки открывает еще один важный источник экономии. В связи с улучшением чистоты поверхности и качества стенки в результате принудительного утонения на полированных матрицах можно использовать листовый материал более низкого качества поверхности (например, 3-й или 4-й групп по ГОСТу 503—71), цена которого составляет иногда 50—70% цены материала 1-й группы.

3. ОБЩАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫТЯЖКИ

Методика является общей для цилиндрических и коробчатых деталей без фланца.

Цилиндрические детали. Исходными данными для технологических расчетов являются:

1. Параметры изделия (рис. 53):

диаметр изделия (средний) $d = d_{\text{вн}} + s = d_{\text{нар}} - s$;

толщина стенки $s \pm \delta$;

толщина дна (исходного материала) $s_0 \pm \Delta$;

глубина (высота) изделия H_0 ;

радиус закругления у дна $r_c \approx R_{\text{пс}}$; $r_c = r + \frac{s_0}{2}$.

2. Характеристики материала: марка, предел прочности при растяжении σ_b кгс/мм², относительное удлинение (равномерное) δ_r , коэффициенты нормальной анизотропии r_θ , r_{cp} .

Расчет технологических параметров

1. Полная расчетная глубина вытяжки

$$H = H_0 + \Delta H, \quad (81)$$

где $\Delta H = (0,25—0,3) H_0$ — припуск на обрезку края (берется по справочникам, увеличенный на фестонообразование и учиты-

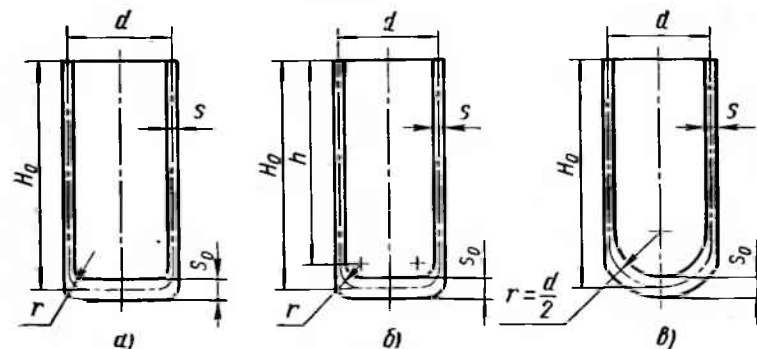


Рис. 53. К расчету технологических параметров

вающий отклонения толщины стенки и материала от номинальных значений).

При больших значениях ($H_d > 5$) увеличивается число промежуточных операций обрезки, поэтому принимают $\Delta H \approx 0,5 H_0$ (например, у сильфонных трубок).

2. Как отмечалось, суммарный коэффициент утонения рассчитывают с целью построения оптимальной технологии, т. е. минимального числа операций и минимального расхода материала.

Для ускорения расчеты можно выполнить с помощью номограммы (см. рис. 50) для любого варианта. В частных случаях используют формулы (79) и (80). Во всех вариантах (А, Б, В, Г) при определении суммарного коэффициента утонения для простоты расчетов приняты номинальные значения толщины стенки s и исходного материала s_0 . Не учтенные при этом отклонения по толщине стенки и толщине исходного материала с достаточным приближением могут быть учтены увеличенным припуском на обрезку (ΔH) в формуле (81).

3. Суммарный коэффициент вытяжки m_d определяют в зависимости от формы детали на основе условия постоянства объема с припуском на обрезку.

Для цилиндрической детали без фланца с малым радиусом у дна ($r < 5 s_0$ или $r < 0,2 d$), которым можно пренебречь в расчетах без большой погрешности (рис. 53, а),

$$m_d = \frac{1}{\sqrt{1 + 4H_d m_s}}. \quad (82)$$

Из аналогичных предпосылок для цилиндра без фланца с $r > 5 s_0$ или с $r > 0,2 d$ (рис. 53, б)

$$m_d = \frac{1}{\sqrt{1 + 4 \frac{H - r_c}{d} m_s + 2,28 \frac{r_c}{d} - 0,56 \left(\frac{r_c}{d}\right)^2}}. \quad (83)$$

Для цилиндра без фланца со сферическим дном (рис. 53, в)

$$m_d = \sqrt{\frac{0,5}{1 + 2(H_d - 0,5) m_s}}. \quad (84)$$

Аналогичным образом можно получить формулы для других типов деталей.

4. Диаметр заготовки

$$D_0 = \frac{d}{m_d}. \quad (85)$$

5. Критерий устойчивости заготовки против складкообразования на конических матрицах с оптимальным расчленением процесса на стадии:

$$\frac{1 - m_{d1}}{36} \gg s_D \gg \frac{m'_{d1} - m_{d1}}{20} \text{ — требуется плоский складкодержатель;}$$

$$s_D \gg \frac{1 - m_{d1}}{36} \text{ — не требуется складкодержатель.}$$

На радиальных матрицах с оптимальным расчленением на стадии:

$$s_D < \frac{m'_{d1} - m_{d1}}{20} \text{ — требуется плоский и тороидальный складкодержатели;}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1 - m_{d1}}{18} \gg s_D \gg \frac{1 - \psi_p \ln \frac{1}{m_{d1}} - m_{d1}}{20} \\ \text{или} \\ \frac{1 - m_{d1}}{18} \gg s_D \gg \frac{m'_{d1} - m_{d1}}{20} \end{aligned} \right\} \text{ требуется плоский складкодержатель}$$

$$s_D \gg \frac{1 - m_{d1}}{18} \text{ — не требуется складкодержатель.}$$

На последующих переходах требуется складкодержатель при $\frac{s_{i-1}}{d_{i-1}} < 1,5\%$.

6. Пооперационные коэффициенты деформации, вычисляемые по формулам (69)–(72) и корректируемые на основе экспериментальных данных и коэффициентов запаса, окончательно уточняют по соотношениям (4) и (5).

На нижних матрицах при вытяжке глубоких изделий применяют «чистую» протяжку, коэффициент утонения которой принимают по соотношению

$$m_{s_i} = (1,25 \div 1,4) m_{s_{\text{пред}}}, \quad (86)$$

где $m_{s_{\text{пред}}}$ вычисляют по формуле (48).

7. Ориентировочное число переходов деформации по уменьшению диаметра n_d и по уменьшению толщины n_s можно определить по номограмме (см. рис. 50) или по формулам

$$n_d = \frac{\lg m_d - \lg m_{d1}}{\lg m_{d_i}} + 1;$$

$$n_s = \frac{\lg m_s}{\lg m_{s_i}}.$$

где принято

$$m_{d_2} = m_{d_3} = m_{d_i};$$

$$m_{s_1} = m_{s_2} = m_{s_i}.$$

8. Размеры полуфабрикатов по переходам определяются из обычных соотношений.

Толщина стенки

$$s_i = s_{i-1} m_{s_i}; \quad (87)$$

при вытяжке через две матрицы

$$\left. \begin{aligned} s_i^n &= s_{i-1} m_{s_i}^n; \\ s_i^v &= s_i^n m_{s_i}^v, \end{aligned} \right\} \quad (88)$$

где индексы v и n обозначают верхнюю и нижнюю матрицы. Средний диаметр вытяжки

$$d_i = d_{i-1} m_{d_i} \quad (89)$$

Глубина цилиндрического полуфабриката без фланца при $r > 5s_0$ на любом переходе

$$\frac{H_i}{d_i} = \frac{0,25}{m_s} \left[\frac{1}{m_d^2} - 1 - 2,28 \frac{r_c}{d_i} + 0,56 \left(\frac{r_c}{d_i} \right)^2 \right] + \frac{r_c}{d_i}; \quad (90)$$

при $r < 5s_0$ удовлетворительная точность расчета получается по формуле

$$\frac{H_i}{d_i} = \frac{0,25}{m_s} \left(\frac{1}{m_d^2} - 1 \right), \quad (91)$$

где m_d и m_s — суммарные коэффициенты за i переходов.

На последующем переходе с $m_{d_i} < 0,7$ при вытяжке через одну матрицу

$$\begin{aligned} \frac{H_i}{d_i} &= \frac{0,25s_0}{s_{i-1}} \left\{ \frac{1}{m_d^2} - \left[1 + 2,28 \frac{r_c}{d_i} - 0,56 \left(\frac{r_c}{d_i} \right)^2 \right] \right\} \times \\ &\times \frac{s_{i-1}}{z_i} - \left(1 - \frac{s_{i-1}}{z_i} \right) \frac{1}{m_{d_i}^2} \left. \right\} + \frac{r_c}{d_i}, \end{aligned} \quad (92)$$

где s_{i-1} — толщина стенки заготовки; z_i — вытяжной зазор на данном переходе.

9. Радиус закругления у дна полуфабрикатов на промежуточных переходах комбинированной вытяжки желательно принимать не менее 0,3 диаметра; например, при $m_{d_{i+1}} > 0,7$

$$r = d_i (1 - m_{d_{i+1}}),$$

при

$$r = \frac{m_{d_{i+1}} < 0,7}{1,5} d_i (1 - m_{d_{i+1}}).$$

Эти формулы учитывают необходимость более равномерного произвольного утонения на участке дна заготовки, падающем на последующем переходе в зону утонения в начальный критический момент.

С точки зрения суммарного эффекта повышения несущей способности опасного сечения (см. гл. II) более приемлемы меньшие радиусы закругления у дна.

Коробчатые детали. Главными задачами, решаемыми при разработке технологии вытяжки коробчатых деталей, являются:

1. Расчет размеров и определение формы контура заготовки.
2. Расчет размеров и формы вытяжных переходов.
3. Расчет параметров штампов для первого и последующих переходов вытяжки.

Коробчатые детали классифицируют по высоте. Низкими считают такие, которые можно вытянуть за один переход вытяжки без утонения ($\frac{H}{B} \leq 0,6 \div 0,8$), высокими — те, для которых требуется больше одного перехода ($\frac{H}{B} > 0,6 \div 0,8$).

Вытяжка без прижима в одну операцию осуществима для коробчатых деталей при $\frac{H}{B} < 0,7$, $\frac{H}{s_0} \leq 14$ и $\frac{r_y}{s_0} > 1$. Здесь H — высота коробчатой детали с припуском на обрезку; B — ширина контура прямоугольной коробчатой детали или сторона контура квадратной; r_y — угловой радиус коробчатой детали по срединной поверхности; $r_y = r_{y.вн} + \frac{s}{2}$.

Однако чаще всего вытяжка коробчатых деталей осуществляется с прижимом из тонколистовых заготовок.

Расчет размеров и определение формы заготовок для вытяжки коробчатых деталей производится по многочисленным методам, основанным на равенстве поверхностей детали и заготовки. При этом не учитывается анизотропия исходного материала.

При комбинированной вытяжке утоняются прямые боковые стенки и угловые цилиндрические элементы прямоугольных и квадратных коробчатых деталей, поэтому расчет заготовки необходимо вести исходя из равенства объема детали $V_{дет}$ объему заготовки $V_{заг}$.

Примем для общего случая коэффициент утонения на прямых стенках и в углах одинаковым. Объем детали можно записать как сумму объемов простых геометрических элементов коробчатой детали (рис. 54, а), откуда определяем эквивалентную поверхность

$$F_{заг} = F_{ст} m_s + F_d + F_p + F_y = F_э, \quad (93)$$

где $F_{ст}$ — поверхность стенки детали;
 F_d — поверхность дна;

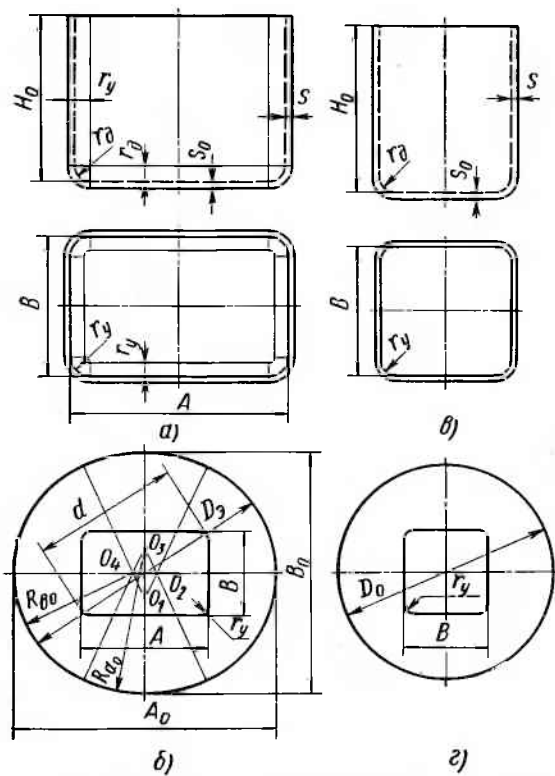


Рис. 54. Чертежи коробчатых деталей и контуры заготовок для них:
 а — прямоугольная деталь (нанесены линии расчленения объема на простые геометрические элементы); в — квадратная деталь; б и г — контуры заготовок, построенные по излагаемой методике

F_p — поверхность ребер у дна;
 F_y — поверхность углов у дна.

Поверхности отдельных элементов коробчатого изделия вычисляем по следующим формулам (при $r_y > r_d$):

$$\left. \begin{aligned} F_{ст} &= (2A + 2B - 1,72r_y)(H - r_d); \\ F_d &= AB - 0,86r_y + 3,14r_d^2 - r_d(2A + 2B - 1,72r_y); \\ F_p &= 1,57r_d(2A + 2B - 1,72r_y) - 9,86r_dr_y; \\ F_y &= 9,86r_dr_y - 3,58r_d^2, \end{aligned} \right\} (94)$$

где r_d — радиус закругления детали у дна (по срединной поверхности); $r_d = r_{д.вн} + \frac{s}{2}$.

Далее на основе F_0 находим диаметр круга для квадратной и параметры «эллипсовидного овала» [5] для прямоугольной коробчатой детали.

На рис. 54, б показано построение контура заготовки для прямоугольной коробчатой детали, вытягиваемой комбинированной вытяжкой.

Эксперименты показывают, что за первый переход вытяжки без утонения по новому методу (см. гл. II) можно получить коробчатые детали примерно в 1,3—1,5 раза выше, а при комбинированной вытяжке — в 1,5—2 раза выше, чем при существующем методе.

Необходимость применения складкодержателя на первом переходе вытяжки по новому методу можно определить по аналогии с вытяжкой цилиндрических деталей на конических матрицах с оптимальным расчленением на стадии.

Квадратные коробчатые детали. Исходными данными для технологических расчетов являются следующие параметры изделия (рис. 54, в): размер стороны в плане — B ; толщина стенки s ; толщина дна (исходного материала) s_0 ; глубина изделия H_0 ; радиус у дна r_d ; радиус угловой r_y ; характеристика материала: $\sigma_b, \delta_p, r_\theta, r_{ср}$.

Максимальную глубину определяем по формуле (81) с учетом припуска на обрезку коробчатых деталей.

Суммарный коэффициент утонения определяем по аналогии с цилиндрическими изделиями.

Суммарный коэффициент уменьшения периметра (вытяжки) находим по формуле

$$m_k = \sqrt{\frac{B^2}{F_3}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,86\left(\frac{r_y}{B}\right)^2 - 0,44\left(\frac{r_d}{B}\right)^2 + \dots}} \cdot \frac{1}{\left(1 - 0,43\frac{r_d}{B}\right)\left[2,28\frac{r_d}{B} + 4m_s\left(\frac{H}{B} - \frac{r_d}{B}\right)\right]} \quad (95)$$

Для квадратных коробчатых деталей значительной глубины предпочтительнее круглая заготовка (рис. 54, г), диаметр которой определяем по формуле

$$D_0 = \frac{1,13B}{m_k} \quad (96)$$

Критерии устойчивости заготовки против складкообразования по экспериментам автора можно принять следующие:

при $\frac{s_0}{D_0} < 1,5\%$ или $\frac{D_0 - B}{s_0} \geq 30$ вытяжка производится со складкодержателем; по суммарному коэффи-

циенту вытяжки m_k и опытным коэффициентам первой и последующих вытяжек на конических матрицах (см. гл. II и III) определяем ориентировочно число переходов, например, по соотношению $m_k = m_{d_1} m_{d_2} \dots m_{k_{II}}$. В случае многопереходной технологии все промежуточные переходы имеют цилиндрическую форму и рассчитываются по приведенной выше методике, а последний переход является собственно процессом вытяжки коробчатой детали. При этом целесообразно, чтобы на последнюю операцию поступала заготовка — стакан с утоненными стенками, что даст возможность производить более эффективный процесс комбинированной вытяжки. Коэффициент вытяжки на последнем переходе в этом случае принимаем равным $m_{k_{II}} = 0,55 \div 0,65$.

На основе суммарного коэффициента утонения можно определить число переходов по утонению. Принимая пооперационные коэффициенты утонения аналогичными принятым при вытяжке цилиндрических изделий, воспользуемся формулой (5).

Как на промежуточных, так и на окончательных переходах здесь также применим метод вытяжки через две матрицы.

На основе пооперационных коэффициентов m_{d_i} и m_{s_i} легко подсчитать размеры полуфабрикатов по переходам.

Высоты промежуточных полуфабрикатов на операциях подсчитываем по формулам для цилиндрических полуфабрикатов. Окончательную высоту (глубину) квадратной детали подсчитываем по формуле

$$\frac{1}{m_k^2} - 1 + 0,86 \left(\frac{r_y}{B} \right)^2 + 0,44 \left(\frac{r_d}{B} \right)^2 -$$

$$\frac{H}{B} = \frac{-2,28 \frac{r_d}{B} + 0,98 \frac{r_d r_y}{B^2}}{4m_s \left(1 - 0,43 \frac{r_y}{B} \right)} + \frac{r_d}{B}. \quad (97)$$

Прямоугольные коробчатые детали. Исходными данными для технологических расчетов являются следующие параметры детали (см. рис. 54, а):

размеры сторон A и B ; толщина стенки s ; толщина дна (исходного материала) s_0 ; глубина детали H_0 ; радиус у дна r_d ; радиус угловой r_y ; характеристики материала: σ_b , δ_p , r_b , $r_{ср}$.

Максимальную глубину и суммарный коэффициент утонения определяют аналогично предыдущему.

Для комбинированной вытяжки прямоугольных коробчатых деталей, как отмечалось, основной формой заготовки является «эллипсоидный овал», параметры которого определяются по известным формулам [5] на основе эквивалентной поверхности детали (F_3).

Необходимость применения складкодержателя может быть установлена по эмпирическим соотношениям

$$\frac{s_0}{B_0} < 2\% \text{ или } \frac{B_0 - B}{s_0} \geq 30.$$

Суммарный коэффициент уменьшения периметра (вытяжки) для прямоугольной коробчатой детали можно определить по формуле

$$m_n \approx \sqrt{\frac{AB}{F_3}}, \quad (98)$$

где F_3 находится по формуле (93).

Сравнивая этот коэффициент с экспериментальными коэффициентами, полученными автором на матрицах расчетной конструкции, можно определить ориентировочное число переходов комбинированной вытяжки.

При многопереходной вытяжке контуры промежуточных переходов представляют собой семейство конфокальных с заготовкой эллипсов, рассчитываемых по методике Д. А. Вайнтрауба [5].

Контуры «эллипсоидных овалов» промежуточных переходов строятся по аналогии с контуром заготовки, но с использованием новых центров радиусов.

Здесь так же, как и при вытяжке цилиндрических и квадратных деталей, возможна вытяжка на первом и последующих переходах через две матрицы.

В отличие от обычно принятой технологии вытяжки коробчатых деталей при комбинированной вытяжке на матрицах с расчетной геометрией появляется возможность использования одинакового по контуру вытяжного зазора.

Кроме того, утонение стенки можно производить с переменными по контуру коэффициентами, что позволяет не только получать равномерные степени деформации в участках различной кривизны, но и регулировать высоту вытягиваемой детали, выравнивая ее при необходимости.

Здесь даны краткие указания по расчету новой технологии квадратных и прямоугольных деталей с небольшим отношением $\frac{A}{B}$ и довольно большими радиусами r_y и r_d . Они основаны на расчетно-теоретических данных и специально поставленных автором экспериментах.

Расчет усилий комбинированной вытяжки

На основе проведенного выше теоретического анализа можно с достаточным приближением к действительным значениям рассчитать технологическое усилие на различных этапах деформирования. Наиболее характерными точками графика усилие —

путь при комбинированной вытяжке являются максимальные усилия на первой стадии, в начальный критический момент комбинированного процесса и на конечном этапе (протяжка края).

Технологическое усилие на операциях вытяжки с принудительным утонением складывается из усилия, действующего в выходном сечении стенки P_c , и усилия на преодоление трения материала по пуансону в пределах зоны утонения P_T :

$$P = P_c + P_T. \quad (99)$$

Растягивающие напряжения в выходном сечении стенки создают силу

$$P_{ci} = L_i s_i \sigma_{zi}. \quad (100)$$

Сила трения на пуансоне может быть вычислена с учетом формулы (31) для нормального напряжения на его контактной поверхности:

$$P_{Ti} = 1,15 \mu_n \sigma_{s_i} \frac{L_i s_i}{\sin \alpha} \left[\ln \frac{1}{m_{s_i}} - \bar{\sigma}_{\rho i} \left(\frac{1}{m_{s_i}} - 1 \right) \right], \quad (101)$$

где L_i и s_i — периметр и толщина стенки детали соответственно.

Очевидно, используя для комбинированной вытяжки коробчатых деталей матрицы с конической заходной частью, можно и в этом случае с некоторым приближением рассчитывать растягивающие напряжения в выходном сечении стенки по формулам, выведенным при анализе осесимметричных деталей.

4. ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ЗАГОТОВОК К КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫТЯЖКЕ

В процессе комбинированной вытяжки происходит упрочнение (наклеп) листовых материалов несколько большее, чем при вытяжке без утонения, потому что степень деформации при этом, как правило, больше.

На рис. 55, а показан характер упрочнения, выраженный через твердость по Виккерсу на поверхности вытянутой детали. Из рисунка видно, что в процессе вытяжки без утонения и комбинированной вытяжки твердость материала повышается почти в 2 раза. Характерно, что дно упрочняется примерно на 20—30% за счет растяжения. Видно также, что при комбинированной вытяжке, когда степень деформации достигает больших значений, материал достигает так называемого порога упрочнения и твердость увеличивается уже незначительно по сравнению с вытяжкой без утонения. Интенсивность упрочнения при холодной пластической деформации можно определить по характеру кривой истинных напряжений. На рис. 55, б приведены диаграммы истинных напряжений некоторых исследованных автором мате-

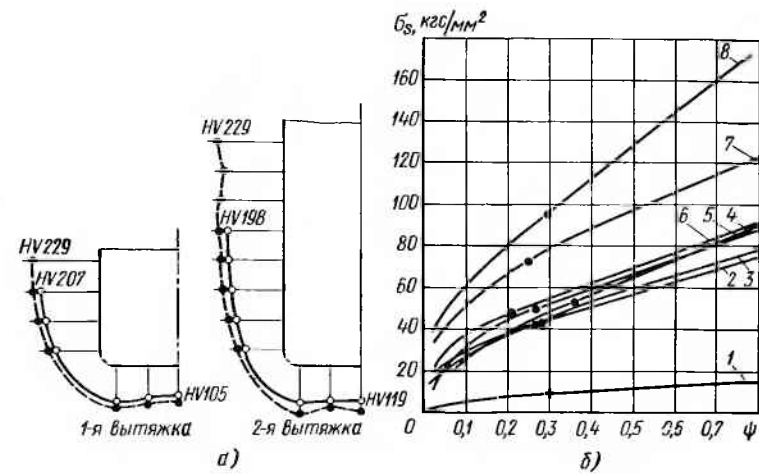


Рис. 55. Характер упрочнения листовых материалов.

а — твердость поверхности стакана:

—○—○—○ при вытяжке, $\frac{z}{s_0} = 1,2$;

—●—●—● при комбинированной вытяжке, $\frac{z}{s_0} = 0,7$.

Материал — низкоуглеродистая сталь; б — диаграммы истинных напряжений: 1 — алюминий АМц-М, $\sigma_B = 6 \text{ кгс/мм}^2$, $s_0 = 4,3 \text{ мм}$; 2 — сталь 08кп, $\sigma_B = 31,5 \text{ кгс/мм}^2$, $s_0 = 1,35 \text{ мм}$; 3 — латунь Л80, $\sigma_B = 32 \text{ кгс/мм}^2$, $s_0 = 1 \text{ мм}$; 4 — никель, $\sigma_B = 37 \text{ кгс/мм}^2$, $s = 10 \text{ мм}$; 5 — латунь Л63, $\sigma_B = 34 \text{ кгс/мм}^2$, $s_0 = 1 \text{ мм}$; 6 — сталь 10, $\sigma_B = 38 \text{ кгс/мм}^2$, $s_0 = 3 \text{ мм}$; 7 — бериллиевая бронза Бр.Б2, $\sigma_B = 55,3 \text{ кгс/мм}^2$, $s_0 = 1 \text{ мм}$; 8 — сталь 0Х18Н10Т, $\sigma_B = 69 \text{ кгс/мм}^2$, $s_0 = 1 \text{ мм}$

риалов (характерно, что кривая твердости стенки, приведенная на рис. 55, а, аналогична кривой истинных напряжений).

Комбинированная вытяжка связана обычно с большими степенями деформации на каждой операции, но это не исключает возможности построения также технологии без промежуточных отжигов.

Однако в случае больших межоперационных заделов полуфабрикатов происходит старение материала и промежуточные отжиги неизбежны.

Отжиг полуфабрикатов из различных материалов проводится и в случае комбинированной вытяжки по общепринятым режимам для тонкостенных полых деталей с толстым дном [4, 34].

Заготовки, поступающие для межоперационной термообработки при вытяжке, должны быть тщательно очищены от грязи, антикоррозионной или технической смазки во избежание пригорания масла.

После открытого отжига весьма распространенной операцией по удалению окисной пленки является травление. Операции трав-

ления и многократной промывки значительно удлиняют технологический цикл изготовления изделий.

Кроме значительного повышения трудоемкости, межоперационные отжиги при вытяжке ухудшают качество поверхности и структуру материала изделия. Так, например, в процессе многократного (13—18 раз) повторения термохимических операций при вытяжке сильфонных трубок из стали X18H10T содержание углерода в ней может возрасти в 2—3 раза по сравнению с исходным [4].

При глубокой вытяжке, построенной на основе метода комбинированной вытяжки, снижается общее число вытяжных переходов, уменьшается также число термохимических операций; качество материала изделий не ухудшается.

Условия трения, технологическая смазка и охлаждение. При комбинированной глубокой вытяжке, как отмечалось, по сравнению с вытяжкой и протяжкой повышается степень деформации на каждой операции.

Увеличение степени деформации создает более тяжелые условия на контактных поверхностях, поэтому требуется особое внимание обращать на условия трения между заготовкой и вытяжным инструментом. Условия трения здесь характеризуются в основном следующими факторами: удельными давлениями, смазкой и материалами трущихся пар.

Основное требование к технологическим смазкам — снизить коэффициент трения. Однако в схемах, благоприятных для больших пластических деформаций, важной характеристикой технологической смазки являются ее противозадирные свойства, т. е. способность обеспечивать прочную, неразрывную пленку, разделяющую поверхности заготовки и инструмента в тяжелых температурно-силовых условиях контакта.

В связи с этим можно рекомендовать для комбинированной вытяжки те же смазки, что и при протяжке. Для углеродистой стали наиболее широко применяется фосфатирование с последующей пропиткой мыльным раствором и сушкой и контактное меднение с последующей смазкой мыльным раствором или масляно-меловым составом [34]. В последнее время за рубежом широко используются для различных сталей технологические смазки на основе дисульфида молибдена (MoS_2).

Автором был разработан и успешно внедрен простой и дешевый способ предохранения стальных деталей от задиров при вытяжке вместо сложного и дорогостоящего фосфатирования [7]. Сущность способа состоит в применении гидрата окиси железа $Fe(OH)_3$, т. е. ржавчины, в качестве подслоя (твердого наполнителя) мыльной пленки. Гидрат окиси железа обладает высокой степенью дисперсности и равномерно покрывает всю поверхность заготовки. Кроме того, будучи рыхлой и пористой, пленка ржавчины обладает хорошей адсорбционной способностью.

Для получения подслоя из гидрата окиси железа в производственных условиях заготовки из углеродистой стали после очередной вытяжки и открытого отжига подвергают обработке по определенной технологии (табл. 21).

Таблица 21

Технология получения двухслойной противозадирной технологической смазки на углеродистых сталях

| № операции | Операции | Состав ванны | Температура |
|------------|--|---|-------------|
| 1 | Травление 15—20 мин | 20%-ная соляная или серная кислота | — |
| 2 | Промывка (3—4-кратное погружение) | Вода проточная холодная | — |
| 2а | Промывка горячая (3—4-кратное погружение) | Вода проточная | 60—95° С |
| 3 | Вылеживание на воздухе до образования легкого налета желтого цвета (не более 30 мин) | — | — |
| 4 | Омыливание | 20%-ный водный раствор ядрового мыла (60%-ного) | 50—55° С |
| 5 | Сушка в сушильной камере до затвердевания пленки мыла | | 80° С |

Примечание. Операция 2а предназначена для лучшего удаления кислоты в случае тонкостенных деталей.

Длительное хранение заготовок с налетом ржавчины может привести к углублению коррозии со всеми вытекающими отсюда последствиями, поэтому омыливание и сушка являются обязательными операциями и для тех партий заготовок, которые по условиям производства не сразу подвергаются вытяжке. Сухая мыльная пленка препятствует развитию коррозии.

Опыт показал, что применение такой двухслойной пленки технологической смазки (гидрат окиси железа + мыло) при глубокой вытяжке обеспечивает получение гладкой, блестящей поверхности изделий без царапин и задиров. Это свидетельствует о высоких противозадирных качествах разделительного слоя, так как мыло, реагируя с водой и с $Fe(OH)_3$, частично разлагается на жирные кислоты, которые, в свою очередь, образуют

металлические (железные) мыла. Как известно, металлические мыла прочно удерживаются на поверхности металла и служат хорошими смазками [38].

Для операций вытяжки стали с более тяжелыми контактными условиями разработана разновидность описанной смазки — трехслойная технологическая смазка. Она характеризуется наличием двухслойной твердой пленки в виде пленок меди и гидроокиси железа, пропитанных слоем жидкой технологической смазки, т. е. фактически смазка получается трехслойной: медь плюс гидроокись плюс пленка, например, мыльной смазки.

Двухслойную твердую пленку пропитывают жидкой технологической смазкой и производят вытяжку с предварительной сушкой или без сушки жидкой смазки.

Трехслойная технологическая смазка создает более прочный разделительный слой на контактной поверхности в очаге пластической деформации и позволяет, в частности, производить с большей надежностью вытяжку через две матрицы.

В процессе штамповки гидроокисная пленка сдвигается с медной пленки, смешивается с жидкой смазкой и служит твердым наполнителем, а медная пленка, содержащая в своих многочисленных порах «пробки» гидроокиси, пропитанной жидкой смазкой, имеет более высокие разделительные и антифрикционные свойства, чем обычная медная пленка.

Испытания такой смазки в серийном производстве при комбинированной вытяжке через две матрицы показали ее хорошие противозадирные свойства; увеличилась стойкость вытяжного инструмента и улучшилось качество изделий.

Особенно сложные условия трения наблюдаются при комбинированной вытяжке коррозионностойких сталей. Смазки здесь должны быть более вязкими и термостойкими, так как материал разогревается при вытяжке до 120°C [22], а в зоне деформации утонения температура может подниматься значительно выше.

Известно, что фосфатную пленку, эффективно используемую при штамповке углеродистых сталей, нельзя применять для нержавеющей сталей, так как фосфатные растворы не реагируют со сталями, содержащими хром и никель в количестве свыше 4%. Поэтому для коррозионностойких сталей рекомендуются органические лаки типа ХВЛ-21, АВ4, термостойкие типа К1, К2, меднение, известкование, а также пленки оксалата железа, оксидные пленки в сочетании с мыльной пленкой и др. [22, 34, 46].

На первой операции комбинированной вытяжки коррозионностойких сталей типа X18H10T автором были испытаны следующие технологические смазки: пленка цапон-лака+масляная пленка, пленка цапон-лака+пленка мыла, оксидная пленка+пленка мыла. Качество поверхности у стаканов, вытянутых с пленкой лака+масло или мыло, характеризуется глубокими вмятинами от лака на поверхности утоненной стенки. Кроме того,

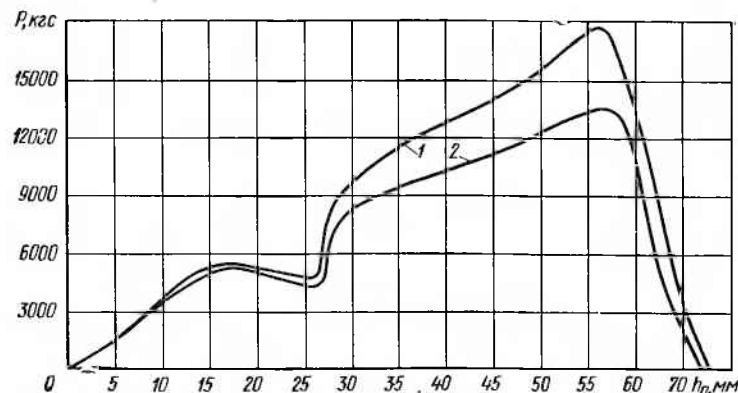


Рис. 56. Кривые усилие — путь при комбинированной вытяжке коррозионностойкой стали ($m_{s_1}=0,7$) с различной структурой технологической смазки:

1 — лак+машинное масло; 2 — лак+мыльная пленка. Материал — сталь 0X18H10T; $s_0=1,04$ мм; $m_{d_1}=0,57$; $m_{s_1}=0,67$

при утонении стенки лаковая пленка разрывается и сползает с поверхности заготовки, в связи с чем возникает опасность контакта («схватывания») с инструментом. Высокое качество поверхности изделий достигается оксидированием поверхности нержавеющей стали с последующим омыливанием и сушкой.

Кривые усилие — путь, записанные при вытяжке стаканов из стали 0X18H10T с различной структурой технологической смазки, характеризуют более высокие антифрикционные свойства структуры лак+мыло, чем лак+масло, проявляющиеся в снижении усилия (рис. 56).

Для подготовки перед вытяжкой поверхности заготовок из алюминиевых сплавов можно рекомендовать способ, заключающийся в покрытии поверхности заготовки пленкой из водного раствора окиси цинка и едкого натра химическим путем с последующей пропиткой мыльным раствором и сушкой¹.

Эффект такой смазки состоит в легкости ее нанесения и удаления при высоком качестве разделительного слоя на контактной поверхности.

Следует отметить, что для более эффективного использования комбинированной вытяжки сталей и латуней необходимо иметь не только стойкие технологические смазки и вытяжной инструмент из твердых сплавов, но и разработать систему охлаждения рабочей зоны штампа, например, распыленными смазочно-охлаждающими жидкостями по типу применяемых в разделительных операциях [27] или непрерывной подачей охлажденной эмульсии.

¹ В. В. Баташева и др. Способ смазки деталей из алюминиевых сплавов перед холодной штамповкой. Авторское свидетельство № 180166, кл. 7с, 16; 23с, 1/01, 1966.

Глава VI. КОНСТРУКЦИИ ШТАМПОВ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫТЯЖКИ

1. ОБЩАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ЧАСТЕЙ ШТАМПОВ

Радиальные матрицы. Совмещение значительных деформаций по периметру с деформацией утонения при комбинированной вытяжке предъявляет высокие требования к геометрии рабочих частей вытяжных штампов.

Этим требованиям меньше всего удовлетворяет традиционная геометрия вытяжной матрицы с радиальной заходной частью, наиболее широко используемая для вытяжки. Но для некоторых типов деталей (например, с плоским фланцем) применение матриц с радиальным профилем неизбежно. Для расчета радиуса закругления такой матрицы различные исследователи рекомендуют эмпирические соотношения типа $R_m = (6 \div 10) s_0$. Такая величина радиуса вызывает значительное противонапряжение при комбинированной вытяжке, что не всегда приемлемо. Более благоприятные условия (с расчленением на стадии) как при вытяжке, так и при комбинированной вытяжке обеспечивает матрица с радиусом, вычисленным по формуле (37).

Одноконусные матрицы. Для первого перехода вытяжки весьма эффективным является конический профиль вытяжной матрицы, уменьшающий усилие деформирования и увеличивающий степень вытяжки. Однако имеются рекомендации лишь для применения таких матриц при вытяжке заготовок с большой относительной толщиной, не требующих складкодержателя [34, 41].

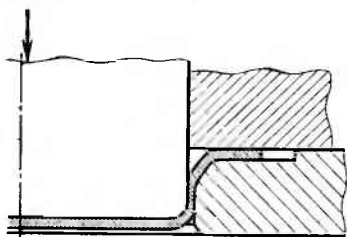


Рис. 57. Схема вытяжки на конической матрице (с конструктивно принятыми параметрами) с плоским складкодержателем

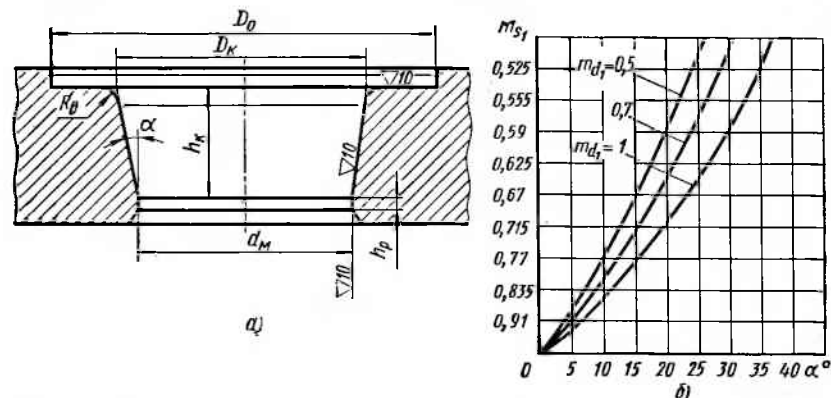


Рис. 58. Одноконусная матрица с расчетными параметрами (а) для вытяжки со складкодержателем и график для определения угла матрицы (б)

Используемые иногда в практике конструктивно принятые параметры конических матриц для первой вытяжки с плоским складкодержателем (рис. 57) создают весьма тяжелые условия деформации, так как малая высота конической части приводит к сложению усилий на первой и второй стадиях [18].

С развитием комбинированной вытяжки потребовалась разработка штампов оптимальной конструкции с одноконусными матрицами и плоским складкодержателем и с двухконусными — без складкодержателя [15]. В этих штампах реализуется принцип оптимального расчленения процесса вытяжки на две стадии.

Основными параметрами матрицы штампа для вытяжки со складкодержателем (рис. 58), оказывающими существенное влияние на процесс деформации заготовки, являются входной диаметр конуса D_k , радиус скругления входной кромки R_b , угол матрицы α . Необходимо проводить расчет оптимальных значений указанных параметров, поскольку от них зависят условия складкообразования и условия для утонения.

Угол матрицы, благоприятный для процесса комбинированной вытяжки на первом переходе, можно определить по соотношению (32).

Расчеты по этой формуле показывают, что при уменьшении угла до $\alpha \approx 5^\circ$ напряжения снижаются. Учитывая, что малые углы чрезмерно увеличивают высоту матрицы, можно рекомендовать $\alpha = 8 \div 18^\circ$. Это согласуется и с графиком, полученным по методу верхних оценок (рис. 58, б).

Такие углы матрицы удовлетворяют и требованиям устойчивости конического фланца заготовки после выхода его из-под складкодержателя (т. е. на второй стадии), что можно проверить по следующей формуле:

$$\alpha \leq \arcsin \frac{40s_D (10s_D + m_{d1})}{1 - m_{d1}^2} \quad (102)$$

Радиус скругления входной кромки конуса матрицы принимаем

$$R_B = (2 \div 4) s_0. \quad (103)$$

Так как эта кромка играет важную роль в предотвращении складкообразования и через нее перетягивается заготовка, то для ее закругления можно воспользоваться также соотношением для перетяжных ребер

$$R_B = 0,05 d_M \sqrt{s_0}. \quad (104)$$

Оптимальное расчленение процесса на стадии, как отмечалось, обеспечивается расчетом входного диаметра конуса по формуле (42), полученной из условия равенства боковой поверхности изделия, вытянутого без утонения стенки, поверхности рабочего конуса матрицы¹. Расчеты по формуле (48'), представленные в табл. 4 и 5, показывают, что чем меньше угол α , тем меньше степень вытяжки на второй стадии и, следовательно, тем меньше противонапряжение в начальный критический момент комбинированного процесса. С уменьшением степени вытяжки на второй стадии связана и большая устойчивость края фланца.

Оптимальному расчленению процесса соответствует и высота рабочего конуса матрицы, которая должна быть равна (или несколько больше) величине

$$h_K = \frac{D_K - d_M}{2 \operatorname{tg} \alpha} \quad (105)$$

или

$$h_K \approx \frac{D_0 \left[\sqrt{(1 - m_{d_1}^2) \sin \alpha + m_{d_1}^2} - m_{d_1} \right]}{2 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (105')$$

В случае использования такой матрицы для вытяжки радиус в месте перехода конуса в рабочий поясок находится по формуле (50) при любом зазоре, большем толщины.

Если же радиус меньше радиуса, рассчитанного по указанной формуле, рекомендуется вытяжной зазор выбирать в соответствии с соотношением (51).

При комбинированной вытяжке на таких матрицах предпочтительно иметь минимальное скругление, радиус которого можно определить по формуле (49).

Двухконусная матрица. Двухконусный профиль матрицы уменьшает ее общую высоту, сохраняя достоинства малого угла рабочего конуса, благоприятного как для вытяжки, так и для комбинированной вытяжки. Этот профиль получается наложением верхнего конуса² на одноконусную матрицу, описанную

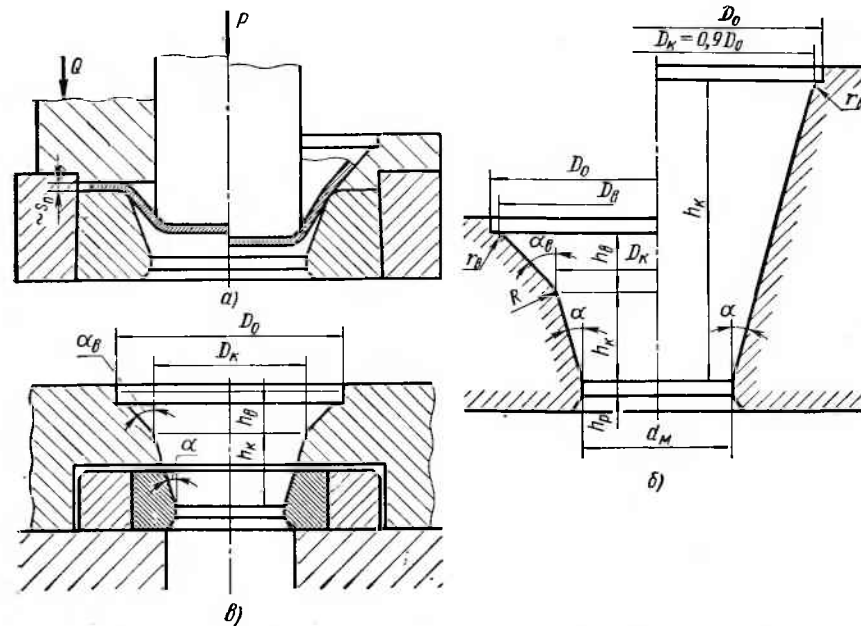


Рис. 59. Варианты двухконусной матрицы с расчетными параметрами: а — в универсальном штампе (справа — составной двухконусный профиль для вытяжки толстых заготовок, слева — одноконусный профиль для вытяжки тонких заготовок со складкодержателем); б — монолитное исполнение в сравнении с одноконусной матрицей для вытяжки толстых заготовок; в — с твердосплавной рабочей частью

выше [15]. Двухконусный профиль матрицы предназначен для вытяжки заготовок с $5\% > s_D > 1,2\%$ без складкодержателя.

Угол верхнего конуса целесообразно принять $\alpha_B \approx 45^\circ$ для заготовок с $s_D < 1,8\%$ и $\alpha_B \approx 30^\circ$ для $s_D > 1,8\%$.

На рис. 59, а показан универсальный вариант штампа с двухконусной матрицей. Сняв верхнее коническое кольцо, получим штамп с одноконусной матрицей, на котором можно производить вытяжку тонколистовых заготовок со складкодержателем.

Двухконусная матрица (рис. 59, б) имеет ряд общих параметров с одноконусной матрицей. Входной диаметр верхнего конуса матрицы принимается по соотношению $D_B = 0,9 D_0$, радиус скругления этой кромки $r = 0,05 D_0$.

Общая высота матрицы складывается из высоты рабочего конуса [формула (105)] и высоты верхнего конуса $h_B = \frac{D_B - D_K}{2 \operatorname{tg} \alpha_B}$.

Между верхним и нижним (рабочим) конусом матрицы необходимо предусматривать плавный переход по достаточно боль-

¹ См. сноску 1 на стр. 109.

² См. сноску 2 на стр. 109.

шому радиусу, который можно определять по следующим эмпирическим соотношениям:

$$R = \frac{D_0 - d_m}{3} \quad (106)$$

или $R = (6 \div 10) s_D$ (где s_D — в процентах).

При большой относительной толщине заготовки ($s_D > 5\%$) или небольших степенях вытяжки двухконусный профиль выродается в одноконусный с большим закруглением верхней кромки. Высоту конуса такой матрицы вычисляют из формулы

$$\frac{h_m}{D_0} = \frac{(m'_{d_i} + s_D) [1 - (1 - \sin \alpha) \operatorname{tg} \alpha] + (1 - \sin \alpha) \operatorname{tg} \alpha - s_D m_{s_1} - m_{d_1}}{2 \operatorname{tg} \alpha}, \quad (107)$$

а радиус входной кромки

$$R_n \approx \frac{D_0 - D_k - s_0}{2}. \quad (108)$$

Для комбинированной вытяжки без складкодержателя, по-видимому, благоприятными окажутся профили матриц по трактрисе, по упрощенной трактрисе и т. д., хотя из-за сложности изготовления они не получили распространения.

Матрица повышенной стойкости. При комбинированной вытяжке в связи со значительными распирающими усилиями конические матрицы на первом и последующих переходах рекомендуется бандажировать для предотвращения упругого увеличения размера или даже разрыва. Для уменьшения износа рабочую часть матриц при комбинированной вытяжке целесообразно армировать износостойкими материалами. Но изготавливать сложный профиль матрицы целиком из твердого сплава нерационально.

На рис. 59, в показана конструкция матрицы с расчетной геометрией и с твердосплавным рабочим элементом, разработанная автором для массового производства стальных изделий. Особенностью конструкции является малый расход твердого сплава, простота изготовления вставок из твердого сплава отдельно от стальной части матрицы и простота их сборки или замены.

В зависимости от условий эксплуатации штампов и требований точности бандажированные твердосплавные вставки можно соединять со стальной частью матрицы жестко или подвижно («плавающая» матрица).

Матрицы для последующего перехода. Для последующего перехода комбинированной вытяжки, как отмечалось, наиболее приемлемой является коническая матрица. При радиальной матрице создаются излишние потери на изгиб и трение, и поэтому для комбинированной вытяжки она неприемлема. В случае комбинированной вытяжки деталей с фланцем такую мат-

рицу можно использовать, но с соответствующим значительным ограничением степени деформации.

Угол конической матрицы можно принимать аналогично рекомендованным для вытяжки без утонения [31, 32], т. е. $\alpha = 10 \div 30^\circ$. Меньшие значения углов — для больших относительных толщин заготовки, большие — для тонкостенных заготовок.

Угол матрицы последующего перехода (рис. 60) можно определить по следующей формуле [9]:

$$\frac{1}{m_{s_i}} + m_{s_i} - \frac{1,3 \sin^2 \alpha \cos \frac{\alpha}{2}}{\cos \alpha \sqrt{\frac{d_{i-1}}{s_{i-1}}}} - \frac{2}{\cos \alpha} = 0. \quad (109)$$

Высоту конуса матрицы для последующего перехода рассчитывают из геометрических соотношений таким образом, чтобы входной диаметр конуса был не меньше наружного диаметра заготовки — стакана.

На последующих переходах комбинированной вытяжки эффективно также применение конической матрицы с реактивной полостью, предложенной И. А. Норицыным [31]. Таким образом, для последующих переходов можно рекомендовать конструкции матриц, представленные на рис. 60. Угол матрицы можно найти по графику (рис. 60, в), построенному по формуле (109).

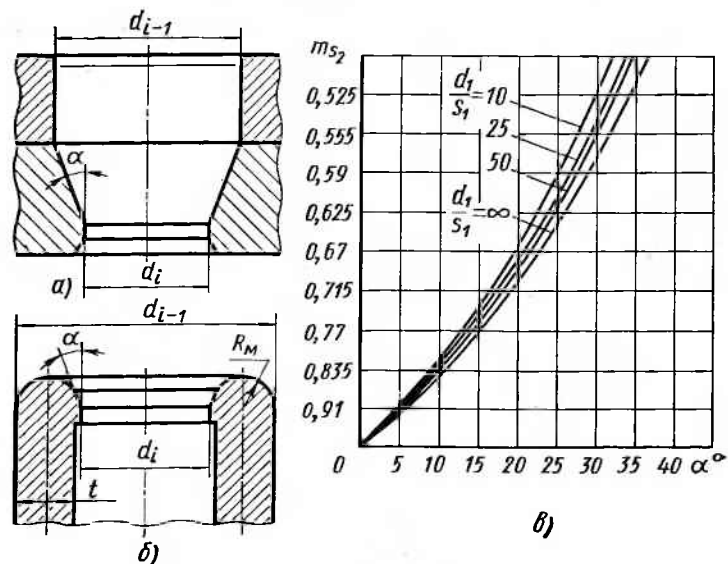


Рис. 60. Матрицы для последующего перехода комбинированной вытяжки, для прямой вытяжки с фиксатором — реактивной полостью (а); для реверсивной вытяжки (б) и график для определения угла матрицы (в)

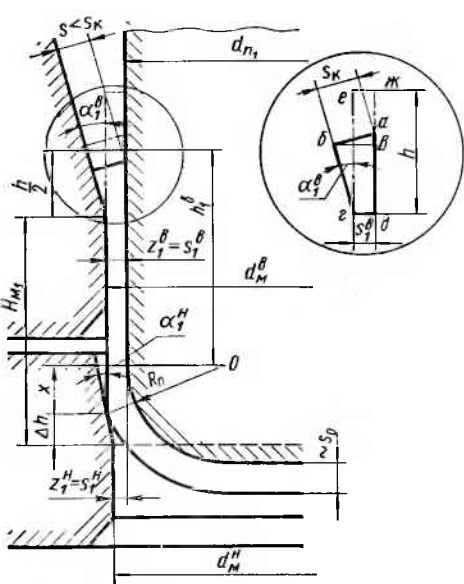


Рис. 61. Схема к расчету оптимального расстояния между вытяжными кромками верхней и нижней матриц

Геометрически наиболее удобно связывать это расстояние с высотой (глубиной) полуфабриката, вытягиваемого на верхней матрице.

На рис. 61 показана общая схема взаимного положения верхней матрицы, нижней матрицы и заготовки в процессе вытяжки на первом переходе.

Момент соприкосновения заготовки с рабочим конусом нижней матрицы должен наступить тогда, когда максимальное усилие с верхней матрицы уже наполовину снизится. Из этого условия расстояние между рабочими вытяжными кромками матриц равно

$$H_{M_1} \approx h_1^B + x + \Delta h - \frac{h}{2}. \quad (111)$$

После подстановки в формулу (111) выражений для слагаемых, которые легко получить из схемы (см. рис. 61), рассчитываем расстояние между рабочими поясками матриц на первом переходе комбинированной вытяжки по формуле

$$H_{M_1} = \frac{0,25d_1}{m_{s_1}^B} \left[\frac{1}{m_{d_1}^2} - 1 - 2,28 \frac{R_{nc}}{d_1} + 0,56 \left(\frac{R_{nc}}{d_1} \right)^2 \right] +$$

Как отмечалось, высота рабочего пояска матриц первого и последующих переходов влияет на процесс вытяжки незначительно. Для определения высоты пояска рекомендуется следующая эмпирическая зависимость:

$$h_p = (0,05 \div 0,15) d_M, \quad (110)$$

где меньшие значения принимаются для больших диаметров ($d_M > 100$ мм).

Расчет параметров штампа с двумя матрицами. При вытяжке через две матрицы с оптимальным силовым режимом необходимо нижнюю матрицу штампа (его вытяжную кромку) располагать на расчетном расстоянии от вытяжной кромки верхней матрицы.

$$+ s_0 \left[\sqrt{1 - (m_{s_1}^B)^2 + \frac{2R_{nc}}{s_0} (1 - m_{s_1}^B)} + \frac{m_{s_1}^B (1 - m_{s_1}^H)}{\operatorname{tg} \alpha_1^H} - \frac{1}{4m_{s_1}^B \operatorname{tg} \alpha_1^B} \right]. \quad (112)$$

На последующем переходе комбинированной вытяжки максимальное расстояние между матрицами определяется по аналогичной формуле

$$H_{M_2} = \frac{0,25d_2}{m_{s_1} m_{s_2}^B} \left[\left(\frac{1}{m_{d_1} m_{d_2}} \right)^2 - 1 - 2,28 \frac{R_{nc}}{d_2} + 0,56 \left(\frac{R_{nc}}{d_2} \right)^2 \right] +$$

$$+ s_0 \left\{ \sqrt{1 - (m_{s_1} m_{s_2}^B)^2 + \frac{2R_{nc}}{s_0} (1 - m_{s_1} m_{s_2}^B)} + \frac{m_{s_1} m_{s_2}^B (1 - m_{s_2}^H)}{\operatorname{tg} \alpha_2^H} - \frac{m_{s_1} \left[\frac{1}{m_{d_2}} - (m_{s_2}^B)^2 \right]}{4m_{s_2}^B \operatorname{tg} \alpha_2^B} \right\}. \quad (113)$$

При вытяжке через две матрицы по указанным схемам на первом и последующих переходах высоту рабочего пояска верхней матрицы необходимо принимать примерно в 2 раза большей, чем при вытяжке через одну матрицу, для обеспечения центрации пуансона с полуфабрикатом в верхней матрице даже в случае недостаточной высоты полуфабриката.

На последующем переходе комбинированной вытяжки без утонения стенки (с оптимальным распределением зазоров) расстояние между матрицами рассчитывают из условия прохождения через верхнюю матрицу донной части заготовки — стакана (см. рис. 35); так как на установившейся стадии, когда деформируется стенка, усилие уже незначительно:

$$H_{M_2} = \frac{0,25d_2}{m_{sd}} \left[\frac{1}{m_{d_2}^2} - 1 - 2,28 \frac{R_{nc}}{d_2} + 0,56 \left(\frac{R_{nc}}{d_2} \right)^2 \right] +$$

$$+ s_0 \left[\sqrt{1 - m_{sd}^2 + \frac{2R_{nc}}{s_0} (1 - m_{sd})} + \frac{m_{sd} (1 - m_{sd}^H)}{\operatorname{tg} \alpha_2^H} \right], \quad (114)$$

где $m_{sd} \approx \frac{z_2}{s_0}$.

В связи с тем, что на нижних матрицах штампов для вытяжки через две матрицы происходит «чистая» протяжка, необходимо рассмотреть вопрос о выборе угла этой матрицы.

Э. Зибель и Г. Вайсс считают, что оптимальным значением угла матрицы является такое, которое при данной степени деформации обеспечивает минимальное технологическое усилие вытяжки с утонением [50].

Связанный с коэффициентом полезного действия процесса критерий оптимальности, который можно назвать энергетическим, пригоден, по-видимому, лишь для оценки процесса вытяжки без утонения, так как здесь степень деформации непосредственно зависит от удельного усилия вытяжки.

При вытяжке с утонением степень деформации в общем случае зависит от растягивающих напряжений в выходном сечении полуфабриката, которые не равны удельному усилию, подсчитываемому как усилие на пуансоне, отнесенное к выходному сечению.

От напряжений в выходном сечении зависят допустимые локальные деформации сдвига, ограничивающие прочность стенки, что было подробно изучено в работах И. П. Ренне и др. [33].

Таким образом, более правильно оптимальный угол матрицы определять исходя из минимума напряжений в выходном сечении стенки, позволяющего получать максимальные степени деформации. При этом усилия на пуансоне могут быть и не минимальными.

Эксперименты Э. Зибеля и Г. Вайсса показывают (рис. 62), что при больших степенях деформации протяжки ($\psi_{\text{п}} \approx 60\%$) разрыв стенки вытягиваемой детали происходит почти при «оптимальном» угле матрицы ($\alpha \approx 25^\circ$), т. е. минимальном для данной степени деформации усиллии вытяжки.

Следовательно, при этом в стенке вытягиваемой детали возникают большие растягивающие напряжения (приводящие к разрыву), чем при меньших углах, где технологические усилия больше. Это объясняется, с одной стороны, соотношением радиальных и осевых напряжений, и с другой стороны, соотношением сил трения на матрице и пуансоне.

Таким образом, при протяжке с большими степенями деформации целесообразно пользоваться малыми углами матриц, хотя при них требуются большие технологические усилия.

Оптимальное значение угла матрицы для протяжки (следовательно, угла нижней матрицы

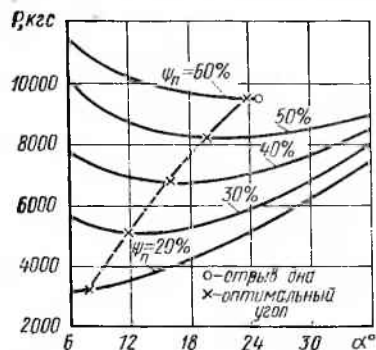


Рис. 62. Зависимость усилий протяжки от угла матрицы α при различных степенях деформации [50]

при комбинированной вытяжке) можно найти из формулы (33), приравняв к нулю производную напряжения по углу $\frac{d\sigma_z}{d\alpha} = 0$:

$$\alpha_{\text{опт}} = \arcsin \sqrt{\left[2\mu_m - (\mu_n + \mu_m) \ln \frac{1}{m_{s_i}^H} \right] \ln \frac{1}{m_{s_i}^H}}; \quad (115)$$

При $\mu_m = \mu_n = \mu$ эта формула совпадает с формулой Е. А. Попова для угла матрицы при протяжке [36].

Для получения изделий с равномерными свойствами по толщине стенки И. П. Ренне и др. рекомендуют выбирать при протяжке угол матрицы на основе теории линий скольжения по соотношению [33]

$$\alpha \leq \arcsin \frac{1 - m_{s_i}}{2m_{s_i}}. \quad (116)$$

Из табл. 22, где приведены расчеты по формулам (115) и (116) и результаты экспериментов Зибеля и Вайсса, видно, что для рассмотренного выше примера со степенью деформации

Таблица 22

Оптимальные углы матрицы при протяжке ($\alpha_{\text{опт}}^\circ$)

| μ_m | μ_n | Степень деформации $\psi_{\text{п}}$, % | | | | | Данные |
|---------|---------|--|------|------|------|------|---|
| | | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | |
| 0,016 | 0,066 | 7,4 | 10,7 | 15,0 | 19,4 | 25,5 | Э. Зибеля И. П. Ренне Е. А. Попова С. А. Валиева |
| — | — | 7,2 | 12,3 | 19,5 | 30 | 48,5 | |
| 0,04 | 0,04 | 6,8 | 7,8 | 8,1 | 7,6 | 4,5 | |
| 0,05 | 0,07 | 7,3 | 8,3 | 8 | 6,2 | 5 | |
| — | — | — | — | — | — | — | |

$\psi_{\text{п}} = 60\%$ оптимальный угол матрицы, рассчитанный на основе растягивающих напряжений в выходном сечении стенки, равен $\alpha = 5^\circ$, а полученный Зибелем на основе усилий вытяжки $\alpha \approx 25^\circ$. Разрушение стенки полуфабриката при $\alpha = 25^\circ$ подтверждает наши рассуждения о неправомерности выбора оптимального угла матрицы при протяжке по минимальному усилию.

Расчеты по формуле (116) для указанной степени деформации дают нереальный результат ($\alpha \approx 48^\circ$). При малых утонениях результаты расчетов по этой формуле совпадают с данными Зибеля и Вайсса.

Для некоторых деталей важно сохранить толщину дна близкой к толщине исходной заготовки. Минимальное растяжение донной части при протяжке обеспечивают малые углы матрицы ($\alpha \approx 8^\circ$). Значительно уменьшается толщина дна детали при протяжке с $\alpha = 20^\circ$ [41].

В соответствии с изложенным можно рекомендовать углы матрицы для протяжки на нижней матрице в диапазоне $\alpha = 7 \div 15^\circ$.

Пуансоны с радиальной кромкой. Исследования различных авторов показывают, что оптимальным, с точки зрения равномерности распределения толщины в опасном сечении и достижения максимальных степеней вытяжки без утонения, является радиус кромки пуансона $R_{\text{п}} = (0,3 \div 0,33) d_{\text{п}}$.

Ввиду того, что при вытяжке без утонения схема напряженного состояния не позволяет получать весьма малые радиусы у дна детали, в технологический процесс вводят дополнительную операцию калибровки радиуса.

Эксперименты по комбинированной вытяжке на конической матрице без складкодержателя показали, что можно получать и сферическую форму дна, и переход дна в стенку практически без скругления (см. рис. 14).

С учетом описанного в гл. I суммарного эффекта повышения прочности стенки после начала комбинированного процесса для пластичных материалов при этой схеме можно рекомендовать $R_{\text{п min}} = (0,2 \div 0,5) s_0$. Однако такой радиус кромки можно назначать лишь на последнем переходе вытяжки, если он требуется по чертежу изделия.

Для промежуточных переходов изгиб материала вокруг кромки пуансона с растяжением необходимо использовать для управления распределением толщины материала на закруглении у дна заготовок — стакана. Чем больший объем материала дна, прилегающего к стенке, будет равномерно растянут (на участке шириной $\frac{d_i - d_{i+1}}{2}$), тем благоприятнее будут начальные условия комбинированной вытяжки на последующем переходе. Однако приближаться к сферической форме торца пуансона не следует, так как снижается устойчивость заготовки на конической матрице и распределение толщины в донной части стакана не является благоприятным.

Исходя из изложенного, радиус кромки пуансона при многопереходной технологии комбинированной вытяжки можно вычислить по формулам (рис. 63, а):

при $m_{d_{i+1}} < 0,7$

$$R_{\text{п}_i} = \frac{d_i - d_{i+1}}{1,5} = 0,67 d_i (1 - m_{d_{i+1}}); \quad (117)$$

при $m_{d_{i+1}} > 0,7$

$$R_{\text{п}_i} = d_i - d_{i+1} = d_i (1 - m_{d_{i+1}}). \quad (118)$$

При $m_{d_{i+1}} = 0,55 \div 0,65$, характерных для нового метода комбинированной вытяжки, по формуле (117) $R_{\text{п}_i} = (0,23 \div 0,3) d_i$.

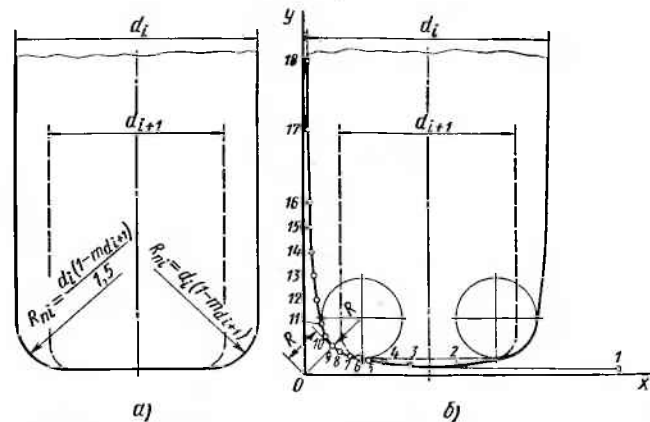


Рис. 63. Оптимальные формы рабочей части вытяжных пуансонов:

а — цилиндр с радиальной кромкой; б — гиперболический профиль (R — полуось гиперболы, равная радиусу кривизны)

При обычно рекомендуемых коэффициентах $m_{d_{i+1}} = 0,7 \div 0,8$, по формуле (118) $R_{\text{п}_i} = (0,2 \div 0,3) d_i$.

При таких радиусах пуансона растяжение околодонных участков составляет 10—15% толщины и охватывает значительную часть дна. Это несколько снижает пик усилия в начале последующей вытяжки по комбинированной схеме.

Для предотвращения соскальзывания заготовки при вытяжке на конической матрице торец пуансона следует выполнять шероховатым (класс чистоты ~ 4), если нет возможности устанавливать небольшой керн-ловитель по центру.

Для облегчения съема изделия пуансон необходимо выполнять с небольшим конусом в пределах допуска на внутренний диаметр изделия.

Пуансон с гиперболическим профилем. В некоторых случаях целесообразно управлять распределением толщины заготовки с помощью пуансона, рабочая часть которого выполнена вращением вокруг вертикальной оси ветви равнобочной гиперболы с полуосью, равной 10—20% диаметра пуансона и с одной асимптотой, параллельной оси вращения (рис. 63, б).

Гиперболический профиль вытяжного пуансона облегчает перераспределение металла в донной части заготовки; кроме того, будучи продолженным вверх по пуансону, он способствует более легкому съему вытянутого изделия по сравнению с цилиндрическим профилем. В зависимости от специфики изделия вертикальный конец ветви гиперболы можно плавко сопрячь с образующей цилиндрической части пуансона, так как непрерывное приближение гиперболического профиля к асимптоте излишне увеличивает утонение верхнего края стенки полуфаб-

риката. Этот переход профиля пуансона в цилиндрический целесообразно производить на расстоянии не менее 2—3 радиусов кривизны от торца пуансона.

Плавный ход кривой профиля вверх от кромки пуансона соответствует постепенному переходу толщины дна к утоненной стенке, что, в свою очередь, определяет более плавный характер кривой усилия без резких переходов. Это благоприятно отражается на работе пресса и на прочности вытягиваемой стенки.

Описанные матрицы и пуансоны с расчетными параметрами профиля обеспечивают значительно большие степени вытяжки без утонения цилиндрических изделий по сравнению с достигаемыми на радиальных матрицах, а также по сравнению с рекомендуемыми для конических матриц. Об этом свидетельствуют коэффициенты вытяжки $m_d = 0,38 \div 0,425$, полученные в лабораторных и заводских условиях на описанных матрицах при вытяжке со складкодержателем и без складкодержателя.

Комбинированная вытяжка на таких штампах позволяет строить надежный технологический процесс с большими деформациями как по диаметру, так и по толщине заготовки.

2. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ЧАСТЕЙ ШТАМПОВ ДЛЯ НОВОГО МЕТОДА ВЫТЯЖКИ КОРОбЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ

Характеристика существующих конструкций штампов для коробчатых деталей. Как уже отмечалось, существенным недостатком традиционного процесса вытяжки являются неравномерность распределения деформаций по контуру и связанные с ней низкое качество изделий и многооперационность.

Основной причиной недостатков схемы вытяжки коробчатых деталей является несовершенная геометрия вытяжного инструмента.

Общепринятой формой матрицы для первой вытяжки коробчатых изделий является матрица с радиальной входной кромкой [43]. На такой матрице вытяжка ведется, как правило, со складкодержателем.

Существенным недостатком радиальной формы кромки матриц для первых и последующих переходов является расположение вытяжной кромки в одной плоскости, что приводит к одновременной деформации заготовки сразу по всему сложному контуру, вследствие чего перегружаются наиболее нагруженные угловые участки. При одновременном втягивании заготовки в рабочий пояс матрицы сразу по всему контуру усилие резко повышается, ограничивая степень вытяжки.

При вытяжке на радиальной матрице со складкодержателем заготовка, находящаяся под давлением прижима, перегибается через заходную кромку матрицы, испытывая на прямых сторонах изгиб с растяжением, а на угловых участках сложный из-

гиб — вытяжку. На этой стадии перехода от плоской заготовки к промежуточной стадии сложного изгиба возникает значительная неравномерность деформации по контуру заготовки, отягощенная сопротивлением от трения под прижимом. Это приводит к потере устойчивости или к интенсивному утолщению заготовки и перенапряжению опасного сечения в углах. В этих условиях не только невозможно осуществлять дополнительную деформацию утонения (комбинированный процесс), но и повышать степень вытяжки без утонения.

Новые конструкции штампов. В основе конструкций — использование принципа оптимального расчленения процесса деформации на стадии (см. сноски на стр. 109).

На рис. 64, а показана составная матрица штампа для вытяжки квадратной детали.

Штамп состоит из матрицы 1 обычной формы с радиальной заходной частью или со скосом по контуру квадратного отверстия. На матрицу установлено кольцо 2 с конической рабочей

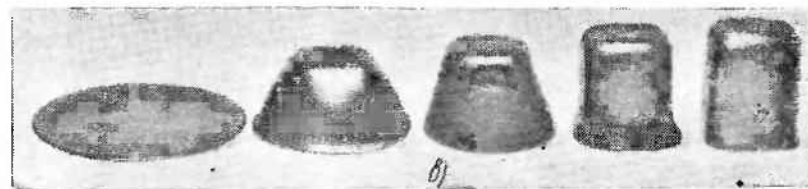
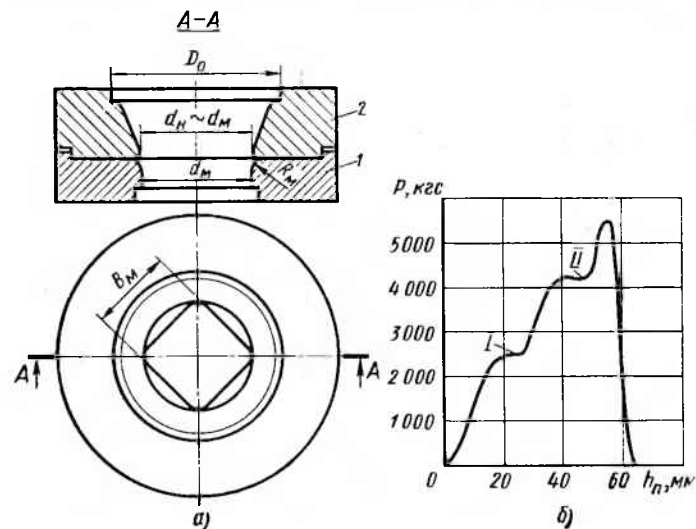


Рис. 64. Составная матрица (а), график усилие — путь (б) и последовательность формоизменения круглой заготовки (в) при вытяжке квадратной детали на этой матрице:

I — усилие на конической матрице; II — усилие суммарное

поверхностью, причем меньший диаметр конуса равен диагональному размеру рабочего отверстия матрицы или наибольшему поперечному размеру входной кромки: $d_m = 1,41 B_m - 0,82 R_{ym} \approx B_m + 2 R_m$ (B_m — сторона квадрата рабочего отверстия матрицы; R_{ym} — угловой радиус матрицы; R_m — радиус входной кромки матрицы).

Такая конструкция (составная) штампа обеспечивает равномерную деформацию в первой стадии, когда квадратный пуансон на верхней матрице — кольцо превращает плоскую заготовку в конусообразную чашку. На второй стадии вытяжки в этом штампе происходит незначительное опережение деформации в угловых участках. Недостаток конструкции в том, что основная часть прямых стенок деформируется одновременно в нижней матрице.

Кривая усилие — путь (рис. 64, б) свидетельствует о скачкообразном увеличении усилия на отдельных этапах вытяжки. Точка I соответствует концу деформации заготовки под прижимом (первая стадия) и началу деформации по квадратному контуру в рабочем пояске матрицы (вторая стадия), в точке II начинает деформироваться утолщенный край в зазоре. Тем не менее штамп такой конструкции дает возможность несколько повысить степень деформации при вытяжке.

Большее опережение деформации угловых участков по ходу пуансона обеспечивает конструкция матрицы штампа, представленная на рис. 65.

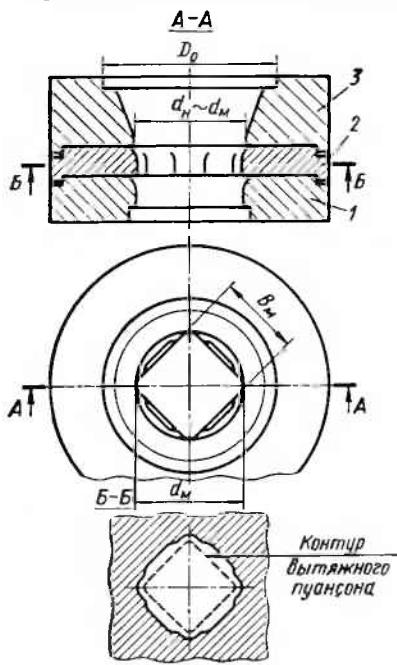
Данная схема штампа отличается от предыдущей наличием промежуточной матрицы (кольца), деформирующей только угловые участки вытягиваемого контура.

Таким образом, в этом штампе обеспечивается расчленение деформации контура по времени: сначала у конусообразной чашки начинают вытягиваться углы, затем прямые стенки одновременно с углами на разных уровнях и после этого только прямые стенки.

Недостатком матрицы этого штампа является громоздкость, сложность изготовления. Кроме

Рис. 65. Вариант составной матрицы для вытяжки квадратной детали:

1 — основная матрица с радиальной вытяжной кромкой; 2 — промежуточная матрица с радиальной вытяжной кромкой в углах контура; 3 — накладное коническое кольцо



того, вследствие расположения вытяжной кромки всех четырех углов на промежуточном кольце в одной плоскости усилие деформации поднимается скачком; второй скачок усилия соответствует моменту вступления в работу вытяжных кромок прямых сторон на нижнем кольце, расположенных также в одной плоскости.

Указанных недостатков нет у штампа оригинальной конструкции с одной матрицей для осуществления нового метода вытяжки коробчатых изделий. Матрица этого штампа обеспечивает наиболее плавный характер кривой усилие — путь.

Особенностью матрицы (рис. 66) является пространственный профиль вытяжной кромки, т. е. кромки на входе в рабочий поясок. Этот профиль получается в результате пересечения конической поверхности заходной части матрицы с контуром рабочего отверстия.

Пространственный профиль вытяжной кромки матрицы в сочетании с конической заходной частью соответствует требованиям нового метода вытяжки, так как при любом некруглом контуре коробчатой детали на участках с большей кривизной в плане вытяжная кромка располагается выше и вступает в работу при вытяжке раньше участков контура с малой кривизной. Кроме того, достоинством вытяжной кромки такого профиля является плавность вступления в работу его участков подобно тому, как это имеет место у скошенных рабочих кромок вырезных пуансонов и матриц в разделительных штампах.

В результате пересечения конической поверхности, например, плоскостями прямых стенок прямоугольных (квадратных) деталей образуется вытяжная кромка гиперболической формы. Это

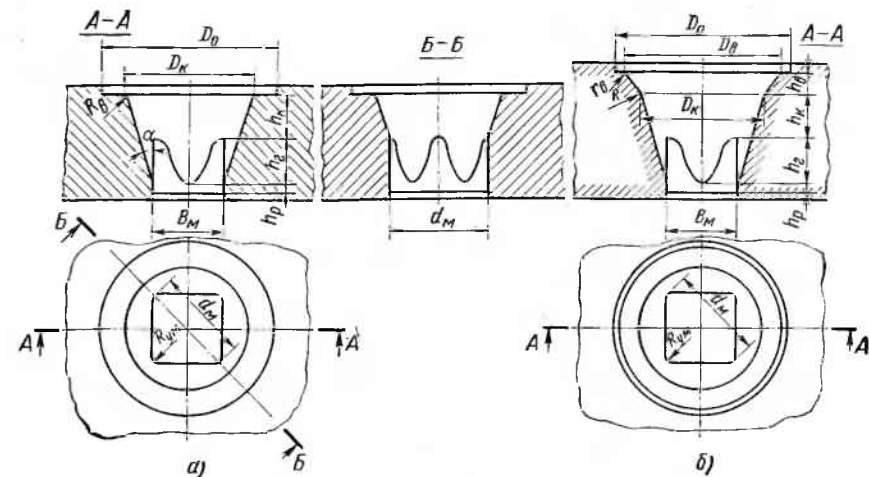


Рис. 66. Матрицы с расчетным профилем для вытяжки квадратной детали: а — со складкодержателем; б — без складкодержателя

способствует направленной раздаче материала (вытеснению) с угловых участков к серединам участков контура с малой кривизной (см. рис. 30).

Так как деформация в углах происходит с опережением и излишки материала вытесняются в прямые стенки раньше, чем начинается деформация последних, исключается распространение деформации с углов на прямые стороны после их оформления, что предотвращает возникновение «хлопунов». Как уже упоминалось, образование «хлопунов» при обычной геометрии матрицы с вытяжной кромкой в одной плоскости можно объяснить частичным распространением деформации с углов на отогнутые уже прямые стенки, что вызывает их коробление.

Расчет параметров штампов новой конструкции. Конструкция штампов основана на расчетных значениях вытяжных зазоров и расчетных параметрах матриц.

Размер стороны рабочего окна матрицы

$$B_M = B_{\Pi} + 2z;$$

$$A_M = A_{\Pi} + 2z,$$

где B_{Π} , A_{Π} — размер стороны пуансона; z — боковой вытяжной зазор, принимаемый при комбинированной вытяжке по коэффициентам утонения для цилиндрических деталей.

Вытяжной зазор в углах (по данным литературы) при вытяжке без утонения принимается несколько большим, чем на прямых сторонах, вследствие органических недостатков схемы деформации.

Применение метода вытяжки коробчатых деталей на матрицах принципиально отличающейся конструкции (с конической заходной частью) позволяет производить вытяжку с одинаковом и с разным по контуру зазором.

Варьирование углового зазора осуществляется путем расчета углового радиуса рабочего отверстия матрицы в зависимости от углового радиуса пуансона (или внутреннего радиуса изделия) и расположения его центра на определенном расстоянии от центра радиуса пуансона.

Рассмотрим несколько случаев построения углового участка вытяжного зазора в штампе. При этом обязательным условием является плавное сопряжение угловых дуг с контуром матрицы и контуром пуансона.

1. Одинаковый по всему контуру, в том числе и в углах, вытяжной зазор обеспечивается без расчета, если радиус пуансона R_{Π} и радиус матрицы $R_{\text{ум}} = R_{\text{уп}} + z$ имеют общий центр.

2. Максимальный угловой зазор получается при $R_{\text{ум}} = R_{\text{уп}}$. Он равен величине смещения центра радиуса матрицы от центра пуансона по биссектрисе угла и может быть выражен через величину бокового вытяжного зазора:

$$z_y = y = z \sqrt{2} = 1,41z. \quad (119)$$

Таким образом, угловой зазор оказывается примерно в 1,5 раза больше бокового вытяжного зазора. Это значит, что при вытяжке без утонения материал утолщается почти беспрятственно, а при комбинированной вытяжке утонения в вершинах углов контура почти нет.

3. Для обеспечения утонения и в углах коробчатого изделия рекомендуется следующее соотношение между боковым и угловым зазорами:

$$z_y = (1,1 \div 1,2) z.$$

Это условие выполняется, если угловой радиус матрицы меньше суммы углового радиуса пуансона и бокового вытяжного зазора на некоторую величину x и центры радиусов разнесены по биссектрисе на величину y , связанную с x соотношением $x = y \sin \frac{\gamma}{2}$ (γ — угол контура коробчатой детали).

Изложенное можно выразить аналитически системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{ум}} &= R_{\text{уп}} + z - y \sin \frac{\gamma}{2}; \\ z_y &= R_{\text{ум}} + y - R_{\text{уп}}. \end{aligned} \right\} \quad (120)$$

Решая системы относительно $R_{\text{ум}}$, получаем

$$R_{\text{ум}} = R_{\text{уп}} + \frac{z - z_y \sin \frac{\gamma}{2}}{1 - \sin \frac{\gamma}{2}}. \quad (121)$$

Подставляя в формулу (121) необходимое значение z_y , например $z_y = 1,1z$, можно найти значение радиуса матрицы:

$$R_{\text{ум}} = R_{\text{уп}} + \frac{z \left(1 - 1,1 \sin \frac{\gamma}{2} \right)}{1 - \sin \frac{\gamma}{2}}. \quad (122)$$

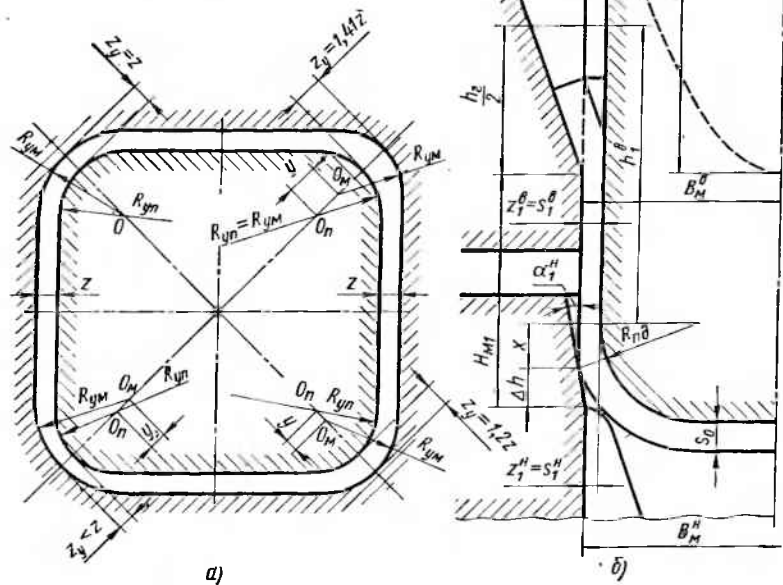
Расстояние между центрами угловых радиусов пуансона и матрицы находим из второго уравнения системы (120):

$$y = \frac{z_y - z}{1 - \sin \frac{\gamma}{2}}. \quad (123)$$

Для прямоугольных коробчатых деталей при $\frac{\gamma}{2} = 45^\circ$ и $z_y = 1,1z$ $R_{\text{ум}} = R_{\text{уп}} + 0,755z$; $y = 0,342z$; при $z_y = 1,2z$ $R_{\text{ум}} = R_{\text{уп}} + 0,512z$; $y = 0,684z$.

Рис. 67. Схемы к расчету параметров штампа:

а — четыре варианта построения углового вытяжного зазора; б — к расчету оптимального расстояния между верхней и нижней матрицами



общая высота конической части матрицы

$$h = h_k + h_r = \frac{D_k - B_m}{2 \operatorname{tg} \alpha} \quad (126)$$

Угол матрицы принимается в тех же диапазонах, что и для круглых матриц, т. е. $\alpha = 10 \div 15^\circ$.

При вытяжке квадратных коробчатых деталей без складкодержателя заходная часть матрицы состоит из двух пересекающихся конусов (см. рис. 66, б). Параметры верхнего конуса рассчитываем по изложенной выше методике для двухконусных матриц.

Если требуется получить большое утонение стенки коробчатой детали или большую глубину за первый переход, можно также применить вытяжку через две матрицы, описанную выше для комбинированной вытяжки цилиндрических деталей.

Расчет профиля нижней матрицы аналогичен вышеприведенному. Высота заходного конуса до начала рабочего отверстия (в углах) в этом случае принимается конструктивно 5—10 мм, угол конуса — обычный, благоприятный для утонения ($\alpha = 8 \div 18^\circ$).

Для обеспечения оптимального силового режима вытяжки через две матрицы расстояние между ними здесь так же, как и при вытяжке цилиндрических деталей, необходимо рассчитывать, но оно в этом случае определяется от вытяжной кромки верхней матрицы в середине прямой стороны до вытяжной кромки нижней матрицы в углах. Это объясняется тем, что, согласно исследованиям автора, максимальное усилие вытяжки на верхней матрице при вытяжке коробчатых деталей имеет место в момент окончания деформации заготовки в углах, после этого деформация края прямых сторон контура происходит при убывающем усилии. В этот момент и целесообразно начать деформирование угловых элементов заготовки в нижней матрице.

Оптимальное расстояние между матрицами (см. рис. 67, б) можно вычислить по формуле

$$H_{к1} = \frac{0,25B}{m_{s_1} \left(1 - 0,43 \frac{r_y}{B}\right)} \left[\frac{1}{m_k^2} - 1 + 0,86 \left(\frac{r_y}{B}\right)^2 + 0,44 \left(\frac{r_n}{B}\right)^2 - 2,28 \frac{r_n}{B} + 0,98 \frac{r_n r_y}{B^2} \right] + s_0 \left[\sqrt{(1 - m_{s_1}^B)^2 + \frac{2R_n}{s_0} (1 - m_{s_1}^B)} + \frac{m_{s_1}^B (1 - m_{s_1}^H)}{\operatorname{tg} \alpha_1^H} \right] - \frac{0,1 (B_m^B - 2R_{ym}^B)}{\operatorname{tg} \alpha_1^B} \quad (127)$$

4. Для получения в углах контура утонения большего, чем на прямых сторонах, необходимо подставлять в формулу (121) $z_y < z$. Тогда R_{ym} увеличивается, а y становится отрицательным.

Все четыре случая построения углового зазора штампа показаны на рис. 67, а.

Матрицы для квадратных коробчатых деталей. При вытяжке квадратной коробчатой детали из плоской заготовки со складкодержателем высоту конической заходной части матрицы (см. рис. 66, а) рассчитываем по формуле (105), в которую вместо диаметра матрицы подставляем диагональный размер рабочего отверстия матрицы d_m :

$$d_m = B_m \sqrt{2} - 2R_{ym} \sqrt{2} + 2R_{ym} = 1,41B_m - 0,82R_{ym} \quad (124)$$

Для вычисления D_k используем формулу (42'), в которую подставляем диагональный размер матрицы.

Глубина гиперболической части матрицы

$$h_r = \frac{d_m - B_m}{2 \operatorname{tg} \alpha} = \frac{0,41 (B_m - 2R_{ym})}{2 \operatorname{tg} \alpha}; \quad (125)$$

Матрицы для прямоугольных коробчатых деталей. Расчет матрицы производится из условия обеспечения максимальной равномерности деформации заготовки по контуру.

Вытяжку плоской заготовки в форме «эллиптического овала» осуществляют на матрице, заходная часть которой выполнена в форме эллиптического конуса.

При вытяжке со складкодержателем эллиптический конус имеет одну ступень, при вытяжке без складкодержателя — две ступени аналогично двухконусному профилю при вытяжке осесимметричных и квадратных деталей.

Рассмотрим одноконусную матрицу (рис. 68, а). Исходным параметром для расчета матрицы является размер заготовки D_0 , называемый эквивалентным диаметром и получающийся пересечением диагонали прямоугольного контура детали с контуром плоской заготовки. Задаемся углом матрицы α в направлении этой диагонали, тогда высота рабочего конуса

$$h_k = \frac{D_{\text{эк}} - d_m}{2 \operatorname{tg} \alpha}, \quad (128)$$

где $D_{\text{эк}} = \sqrt{(D_0^2 - d_m^2) \sin \alpha + d_m^2}$ — эквивалентный диаметр входной кромки конуса матрицы; $d_m = \sqrt{A_m^2 + B_m^2} - 0,82R_{\text{ум}}$ — диагональный размер рабочего (прямоугольного) окна матрицы.

Радиусы овала входной кромки конуса

$$R_{\text{вк}} = \frac{D_{\text{эк}} - \frac{A(A_0 - 2R_{\text{в0}})}{\sqrt{A^2 + B^2}}}{2} i$$

$$R_{\text{ак}} = R_{\text{вк}} - \sqrt{(0,5A_0 - R_{\text{в0}})^2 + (R_{\text{в0}} - 0,5B_0)^2}.$$

Большая ось овала входной кромки

$$A_k = A_0 - 2(R_{\text{в0}} - R_{\text{вк}}).$$

Малая ось овала входной кромки

$$B_k = B_0 - 2(R_{\text{в0}} - R_{\text{ак}}).$$

Общая глубина конуса матрицы до вытяжной кромки в середине короткой стороны рабочего окна складывается из высоты конуса h_k и глубины гиперболической части матрицы h_r (расстояние между уровнем вытяжной кромки в углах и в середине короткой стороны):

$$h_A = h_k + h_r = \frac{D_{\text{эк}} + 0,41B_m - \sqrt{A_m^2 + B_m^2}}{2 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (129)$$

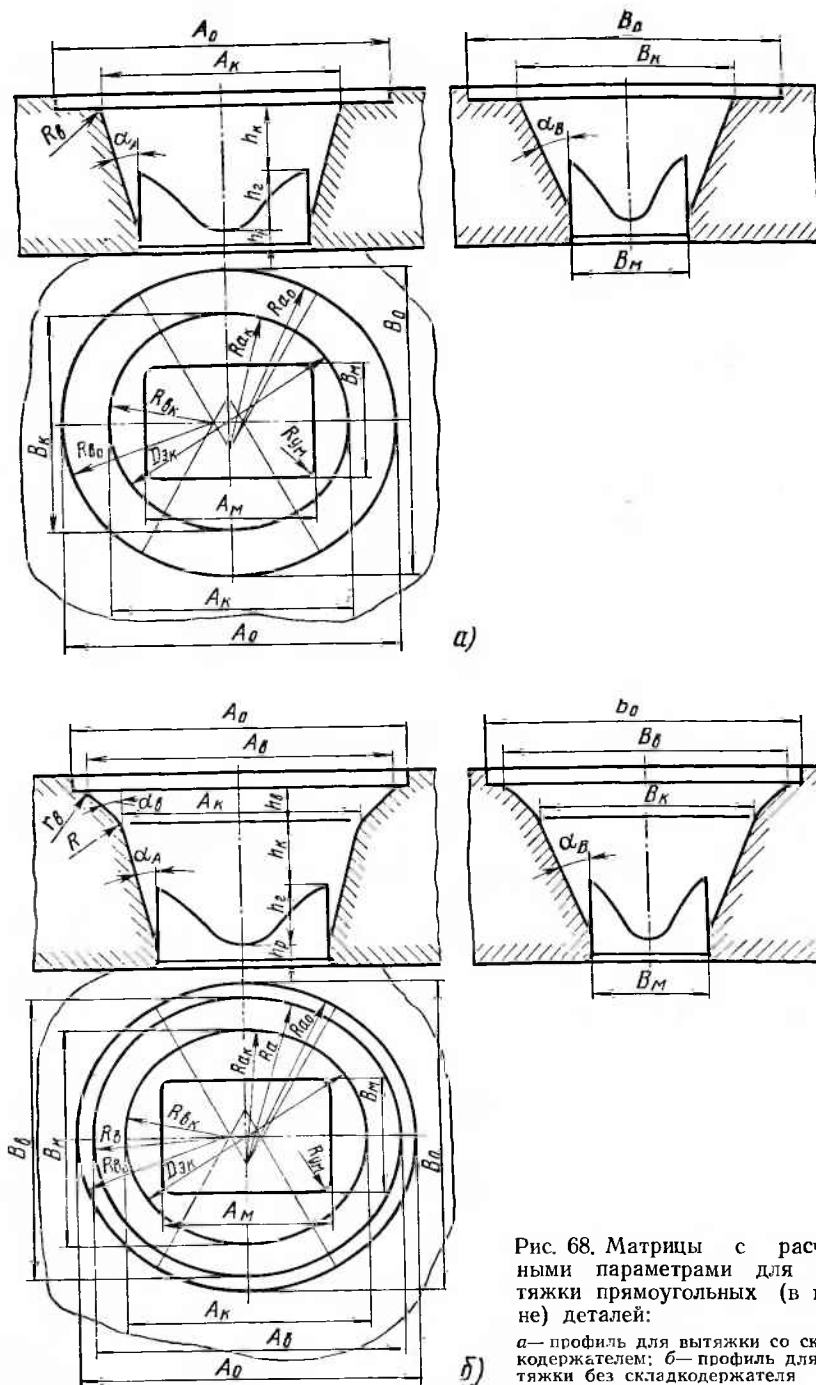


Рис. 68. Матрицы с расчетными параметрами для вытяжки прямоугольных (в плане) деталей:

а — профиль для вытяжки со складкодержателем; б — профиль для вытяжки без складкодержателя

Эту же величину можно выразить

$$h_A = \frac{A_k - A_m}{2 \operatorname{tg} \alpha_A} \quad (130)$$

Приравнивая эти выражения, определяем угол матрицы по большой оси контура:

$$\alpha_A = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{A_k - A_m}{D_{\text{ЭК}} + 0,41B_m - \sqrt{A_m^2 + B_m^2}} \operatorname{tg} \alpha \quad (131)$$

Угол матрицы по малой оси контура определяем из условия равенства глубины матрицы до середины короткой h_A и длинной h_B сторон рабочего окна:

$$\alpha_B = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{B_k - B_m}{A_k - A_m} \operatorname{tg} \alpha_A \quad (132)$$

Наличие в матрице разных по контуру углов (α , α_A , α_B), переходящих плавно друг в друга, позволяет располагать на разных уровнях вытяжные кромки не только в углах по отношению к серединам прямых сторон контура, но и в серединах длинных и коротких сторон, что открывает дополнительную возможность управлять характером кривой усилия вытяжки по пути.

По формулам (131) и (132) угол α_B получается больше, чем α_A , что улучшает условия устойчивости заготовки против складкообразования в наиболее широкой части фланца.

Верхняя (входная) кромка конуса такой матрицы скругляется [радиус скругления в соответствии с упомянутыми ранее соотношениями (103) или (104)].

В случае двухступенчатой (двухконусной) матрицы изложенный расчет дополняется определением размеров овала входной кромки верхнего конуса и его высоты (рис. 68, б).

Входная кромка верхнего конуса строится по овалу, эквидистантному контуру плоской заготовки, на расстоянии

$$\Delta = \frac{A_0 - A_B}{2} = \frac{B_0 - B_B}{2},$$

где $A_B = (0,9 \div 0,95)A_0$ — большая ось этого овала; $B_B = (0,9 \div 0,95)B_0$ — малая ось овала.

Для построения овала входной кромки радиусы вычисляют по формулам

$$R_a = R_{a0} - \frac{A_0 - A_B}{2};$$

$$R_b = R_{b0} - \frac{B_0 - B_B}{2}.$$

Для построения всех овалов матрицы используют общие центры радиусов R_{a0} и R_{b0} .

Высоту верхнего конуса можно определить по большой оси овала:

$$h_b = \frac{A_b - A_k}{2 \operatorname{tg} \alpha_b} \quad (110')$$

Угол α_b принимают обычно 45° (при $\alpha_b = 90^\circ$ матрица превращается в одноконусную, для вытяжки со складкодержателем).

При вытяжке через две матрицы нижнюю матрицу принимаем одноконусной с высотой заходного конуса $h_k = 5 \div 10$ мм.

Имея размеры рабочего окна нижней матрицы по его диагонали

$$d_m^H = \sqrt{(A_m^H)^2 + (B_m^H)^2} - 0,82R_{yM}^H.$$

определяем

$$D_{\text{ЭК}}^H = d_m^H + 10$$

и построением находим радиусы овала входной кромки.

Расчеты глубины матрицы, углов α_A^H и α_B^H по принятому углу выполняем на основании приведенных выше формул.

Оптимальное расстояние от вытяжной кромки в середине прямых сторон контура рабочего отверстия верхней матрицы до уровня вытяжной кромки в углах контура рабочего отверстия нижней матрицы определяем по формуле

$$H_m = \frac{0,785A_0B_0 - AB + 0,86r_y^2 + 0,44r_d^2 - 1,14r_d(A+B - 0,86r_y)}{2m_{s_1}^B(A+B - 0,86r_y)} + s_0 \left[\sqrt{1 - (m_{s_1}^B)^2 + \frac{2r_d}{s_0}(1 - m_{s_1}^B)} - \frac{m_{s_1}^B(1 - m_{s_1}^B)}{\operatorname{tg} \alpha_1^H} \right] - \frac{0,1(B_m - 2R_{yM}^B)}{\operatorname{tg} \alpha_1^B} \quad (133)$$

3. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ШТАМПОВ ДЛЯ ВЫТЯЖКИ НА ПРЕССАХ ПРОСТОГО ДЕЙСТВИЯ

Описанные матрицы с расчетными рабочими профилями используются в штампах для первой вытяжки без утонения или комбинированной вытяжки. Конструкции штампов разработаны для прессов различных типов.

Штампы для первого перехода. Первый переход комбинированной вытяжки на прессе простого действия можно выполнять на типовом штампе совмещенного действия вместе с вырубкой заготовки из полосы. При этом профиль вытяжной матрицы должен быть расчетным одноконусным для вытяжки с прижимом или двухконусным для вытяжки без прижима.

Обычно штампы используют для вытяжки с прижимом в комплекте с типовым буферным устройством, имеющим упругий элемент (резина, пружина, гидроподушка).

Усилие такого прижима в процессе вытяжки увеличивается в несколько раз, вызывая два неблагоприятных явления.

Прежде всего в начале процесса усилие прижима может быть недостаточным (образуются складки), а к концу вытяжки это усилие оказывается чрезмерным, вызывая иногда разрушение заготовки. Это снижает степень вытяжки, увеличивает брак деталей. Если же поджатием буфера удается отрегулировать усилие прижима, обеспечивающее нормальную вытяжку в начале (это усилие составляет примерно $1/4$ усилия вытяжки), то необходимо учесть, что возрастающее давление буфера, иногда значительно превышающее технологическое усилие операции, перегружает пресс вблизи его нижней мертвой точки.

Автором разработаны конструкции штампов совмещенного действия, в которых устранены указанные недостатки упругого прижима. Нейтрализация возрастающего усилия прижима на фланец заготовки обеспечивается ограничителями прижима, контактирующими со складкодержателем особой формы (рис. 69).

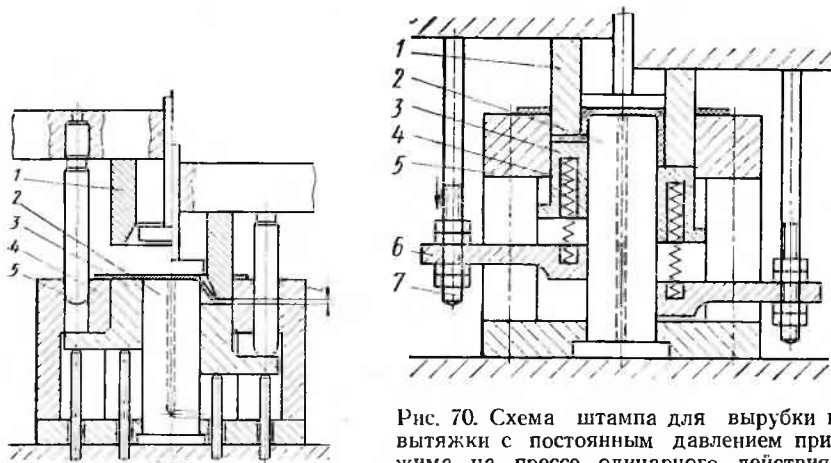
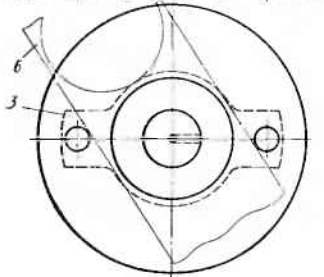


Рис. 70. Схема штампа для вырубki и вытяжки с постоянным давлением прижима на прессе одинарного действия:
1 — пуансон-матрица; 2 — вытяжной пуансон; 3 — прижим; 4 — пружина прижима; 5 — вырубная матрица; 6 — подвижная опора пружин; 7 — тяги



← Рис. 69. Схема штампа для вырубki и вытяжки с постоянным зазором между складкодержателем и матрицей на прессе одинарного действия:

1 — пуансон-матрица; 2 — вытяжной пуансон; 3 — складкодержатель; 4 — вырубная матрица; 5 — направляющая колонка — ограничитель прижима; 6 — вырубная полоса

Конструктивной особенностью штампа является совмещение функций направляющих устройств и ограничителей прижима в одном узле. Это придает штампу компактность и жесткость. Точность штампа обеспечивается тем, что направляющие отверстия для колонок размещены непосредственно в вырубной матрице без промежуточных звеньев.

В процессе утолщения края заготовки зазор между плоскостями складкодержателя и матрицы i может незначительно увеличиваться, но постоянство его минимального значения, равного $\sim 1,1s_0$, создает более благоприятные условия для деформации заготовки, чем прижим без ограничителей, при вытяжке вообще и при комбинированной в частности. Указанный зазор можно изменять, например, с помощью упорных винтов в торцах колонок-ограничителей.

Недостаток типовых буферных устройств — перегрузка прессы в конце рабочего хода — устранен в конструкции штампа, показанной на рис. 70. График усилия A прижима этого штампа с упругим элементом выгодно отличается от графика усилия B обычного буферного устройства (рис. 71), обеспечивая во время рабочего хода прессы практически постоянное, оптимальное воздействие прижима на фланец заготовки $Q_{опт} \approx \text{const}$. Это увеличивает степень вытяжки и надежность операции.

Принцип работы штампа основан на синхронном с вытяжной матрицей перемещении опоры упругих элементов прижима, укрепленной на той же плите (в данном случае на верхней) штампа, что и вытяжная матрица.

Размещение пружин между прижимом и подвижной опорой, жестко соединенной с верхней плитой штампа, создает замкнутую систему в штампе и полностью освобождает пресс от дополнительной нагрузки в процессе рабочего хода, что способствует более благоприятным условиям работы прессы.

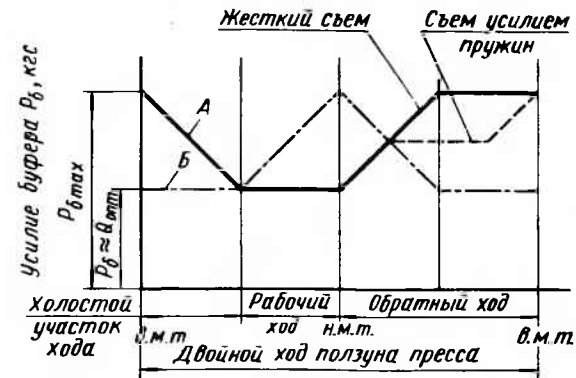


Рис. 71. Графики усилия прижима штампа, изображенного на рис. 70, и обычного буфера

Штампы для последующего перехода. Штампы для последующего перехода комбинированной вытяжки без складкодержателя снабжаются либо направляющей втулкой (укрепленной на нижней плите над матрицей на высоте), позволяющей закладывать в фиксатор заготовку — стакан, либо не имеют направляющих устройств. В последнем случае для установки штампа на пресс используют съемную центрирующую втулку.

На рис. 72 представлен штамп для последующей комбинированной вытяжки через две матрицы с жестко укрепленной на нижней плите направляющей втулкой для пуансона, снабженный устройством для подачи на нижнюю матрицу смазочно-охлаждающей жидкости.

Штамп предназначен для установки на пресс простого действия. Вытяжка производится без складкодержателя. Заготовка — стакан 3 закладывается через окно во фланце 10 в матрицу 4 с реактивной полостью. Пуансон 2 имеет направляющую втулку 1, жестко сцентрированную с верхней матрицей 4, установленной в нижней плите 5 неподвижно. Нижняя матрица 6, плавающая, установлена на расчетном расстоянии от верхней. Съем изделия 8 осуществляется нижним пружинно-секционным съемником 7. Смазочно охлаждающая жидкость подается через канал 9.

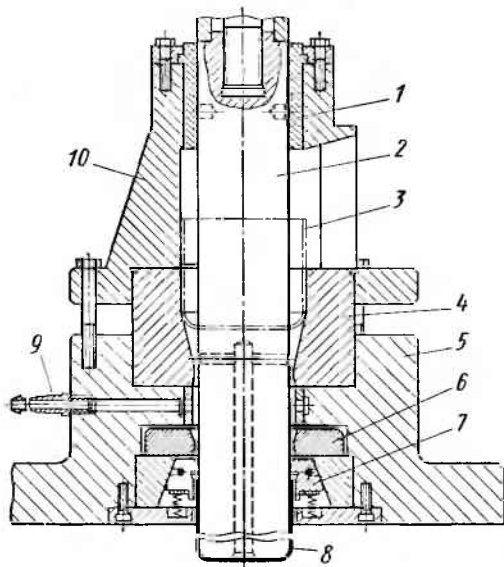


Рис. 72. Штамп для последующего перехода комбинированной вытяжки через две матрицы

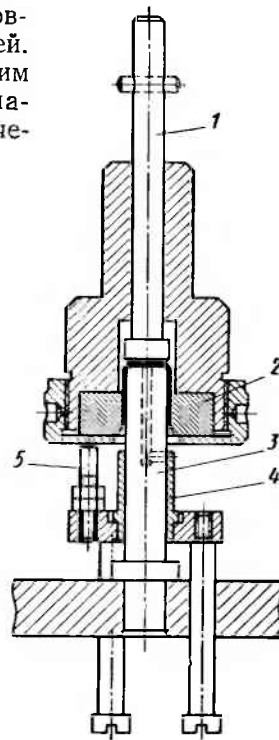


Рис. 73. Штамп для последующей комбинированной вытяжки с обратным выталкиванием детали

Последующая комбинированная вытяжка тонкостенных деталей производится со складкодержателем в штампе для прессы простого действия, показанном на рис. 73 [21]. В этой конструкции весьма рационально решена проблема предотвращения складкообразования. Ввиду того, что при потере устойчивости стенки полой заготовки выпучиваются внутрь, предупреждает складкообразование жесткая трубчатая конструкция складкодержателя 4, центрируемая вытяжным пуансоном 3 и входящая внутрь заготовки — стакана с минимальным зазором. При этом нет необходимости торцу складкодержателя придавать коническую форму, не нужно также этой поверхностью прижимать деформируемую часть стенки заготовки к конусу матрицы. Последнее для комбинированной вытяжки вообще неприемлемо, так как перегружает вытягиваемую стенку дополнительными силами трения, увеличивая противонапряжение. Рациональность приведенной конструкции штампа как раз и состоит в том, что складкодержатель 4, во-первых, является хорошим фиксатором для заготовки — стакана, центрируя систему пуансон — заготовка — матрица, во-вторых, с помощью регулируемого упора 5 складкодержатель может быть подведен к рабочей поверхности матрицы 2 на расстояние, примерно равное толщине стенки, что гарантирует вытяжку без складкообразования и нейтрализацию возрастающего по ходу вытяжки давления буферного устройства на стенку заготовки. Готовая деталь выталкивается из матрицы толкателем 1.

Недостатком штампов с обратным выталкиванием вытянутой детали из матрицы, особенно при комбинированной вытяжке, является почти сухое трение между стенкой детали и рабочим пояском матрицы при обратном ходе. Это приводит к дополнительному износу матрицы, задирам, царапинам на изделиях.

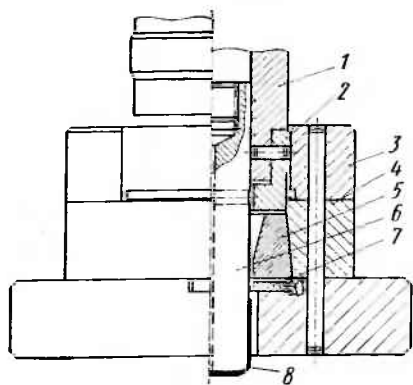
В таких штампах целесообразно подавать смазочно-охлаждающую жидкость на поверхность детали и перед началом обратного хода ползуна прессы.

4. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ШТАМПОВ ДЛЯ ВЫТЯЖКИ НА ПРЕССАХ ДВОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ

Оптимальные условия для вытяжки тонколистовых материалов на первом и последующих переходах создает пресс двойного действия, внешний ползун которого осуществляет функции складкодержателя.

Для комбинированной вытяжки тонколистовых заготовок на производстве используют чаще всего прессы двойного действия.

Штампы для первого перехода. Весьма рационально внешний ползун прессы использовать для вырезки заготовки и прижима. Однако его нередко используют лишь для прижима заготовки, справедливо считая, что точность его направления недо-



статочна для надежной работы режущих кромок штампа. Направляющие колонки и втулки в штампе для прессы двойного действия не всегда удается использовать из-за большой величины хода ползуна.

Эффективным является конструктивное решение, по-

Рис. 74. Штамп с центрирующим выступом для вырубki и вытяжки на прессе двойного действия

казанное на примере штампа совмещенного действия для вырезки и комбинированной вытяжки (рис. 74).

Конструктивной особенностью штампа является центрирующий выступ по контуру на вырубном пуансоне 2, вступающий во взаимодействие с направляющей плитой 3 до начала вырезки заготовки из полосы и обеспечивающий равномерный по контуру зазор между режущими кромками независимо от состояния точности прессы.

Штамп работает следующим образом. Вырубной пуансон 2 составной конструкции, укрепленный с помощью державки 1 в наружном ползуне прессы двойного действия, центрируясь предварительно своим выступом по контуру в направляющей плите 3, вырезает заготовку из полосы на матрице 4 и останавливается на расстоянии от плоскости вытяжной матрицы 5, необходимом для предотвращения складкообразования.

Далее вступает в работу вытяжной пуансон 6, укрепленный во внутреннем ползуне прессы и направляемый внутренней поверхностью державки 1 вырубного пуансона. Для обеспечения благоприятных условий трения на контактных поверхностях необходимо постоянное присутствие смазки (для чего предусмотрены смазочные канавки). Твердость и чистоту обработки этой пары трения и пары вырубной пуансон 2 — направляющая плита 3 необходимо назначать аналогично принятым для направляющих колонок и втулок. Вытянутая деталь 8 при обратном ходе снимается с пуансона съемником 7. Вытяжная матрица в этом штампе изготовлена целиком из твердого сплава и запрессована в вырубную матрицу 4, служащую ей бандажом.

Таким образом, штамп представляет собой компактную, жесткую, замкнутую систему, высокая точность работы которой не зависит от изношенности прессы.

В подобных штампах замкнутая система центрации рабочих частей направляющими устройствами требует самоустанавли-

вающегося крепления вытяжного пуансона в ползуне прессы. Для этого может быть использована сферическая пята в хвостовике или свободная подвеска.

При жестком закреплении вытяжного пуансона в таких штампах возможны перекосы трущихся пар, их задиры, заедание, поломки.

Необходимо отметить, что штампы для вырубki и вытяжки без утонения на прессе двойного действия обычно имеют жесткое крепление вытяжного пуансона и нестрогое направление его в вырубном пуансоне с зазором 0,2—0,3 мм, так как это допускает технология вытяжки без утонения [23, 26].

Использование листового металла холодной прокатки, особенно ленточного, при вытяжке приводит к образованию неровного края изделия (так называемых фестонов). Однако надежность и качество выполнения последующих переходов вытяжки повышаются, если заготовка — стакан имеет ровный край.

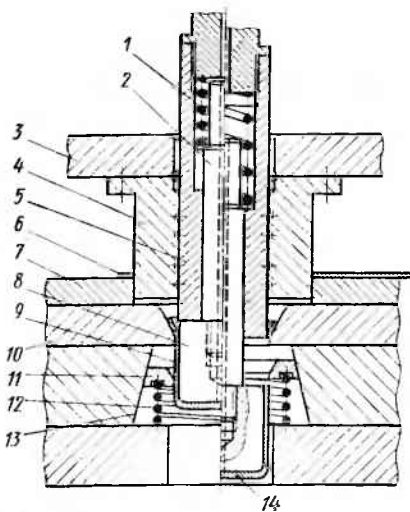
Для получения ровного края стаканов разработана конструкция штампа совмещенного действия для вырезки, комбинированной вытяжки и обрезки.

Известны вытяжные штампы с обрезным уступом на пуансоне, обеспечивающие в конце вытяжки «откусывание» неровного края [34, 35]. Обрезка (обрыв) здесь происходит при входе указанного уступа в рабочий поясok вытяжной матрицы с минимальным зазором (до 0,02 мм). Даже при вытяжке без утонения обрезанная деталь плотно охватывает вытяжной пуансон и съем ее секционным пружинным съемником бывает ненадежным, так как обрезанный край детали весьма незначительно выступает за пределы контура обрезного уступа, а минимальное отверстие сомкнутого съемника ограничено контуром обрезного пуансона (уступа) ввиду того, что последний опускается ниже съемника.

В результате съемник часто соскальзывает с кромки обрезанной детали, царапает ее поверхность, а съема не обеспечивает. Особенно затруднителен съем после вытяжки с принудительным утонением с обрезкой, так как при этой схеме (например, при комбинированной вытяжке) изделие охватывает вытяжной пуансон значительно плотнее (распружиливание стенки сводится к минимуму), усилие съема возрастает. Поэтому обрезка изделий, полученных вытяжкой с утонением, производится чаще всего на токарном или специальном станке с помощью дисковых ножей.

Разработанная применительно к комбинированной вытяжке конструкция штампа для совмещенной вырубki, вытяжки и обрезки показана на рис. 75.

Особенностью конструкции является возможность сдвига вытяжного пуансона по оси после обрезки под действием пружины на величину, большую, чем расстояние от обрезного уступа до нижней поверхности секционного съемника, располо-



женного под матрицей, в его рабочем (сомкнутом) положении. Это позволяет секциям съемника беспрепятственно сомкнуться в промежутке между обрезным и вытяжным пуансонами до минимальной величины его рабочего отверстия, соответствующей контуру вытяжного пуансона. В результате этого съема детали производится воздействием съемника на полную площадь обрезанного торца стенки.

Рис. 75. Штамп для вырубki, вытяжки и обрезки

Штамп работает следующим образом.

Вырубной пуансон 4, закрепленный с помощью верхней плиты штампа 3 в наружном ползуне прессы, взаимодействует с матрицей 7, вырезает заготовку из полосы 6, перемещает ее до плоскости вытяжной матрицы 10 и останавливается, выполняя в дальнейшем функции складкодержателя. Вытяжной пуансон 8, закрепленный вместе с обрезным пуансоном 5, стержнем 2 и пружиной 1 во внутреннем ползуне прессы, опускается до соприкосновения с заготовкой 9. При этом под действием усилия вытяжки пружина 1 сжимается и вытяжной пуансон, смещаясь вверх по оси относительно обрезного пуансона, упирается в последний и совершает рабочий ход вытяжки как одно целое с ним.

По мере выхода вытягиваемой детали из матрицы она входит вместе с вытяжным пуансоном в съемник 11, опуская и раздвигая его секции.

В конце процесса вытяжки к рабочему пояску матрицы приближается режущая кромка обрезного пуансона 5 на величину, меньшую толщины вытягиваемого материала, и отделяет краевой отход. Процессу отделения отхода способствует и давление сжатой пружины 1.

Ход прессы регулируется так, чтобы этот момент соответствовал нижней мертвой точке (н. м. т.) внутреннего ползуна.

В момент отделения отхода срабатывает (с характерным щелчком) сжатая пружина 1 и смещает (проталкивает) вытяжной пуансон сквозь съемник на расстояние несколько большее, чем расстояние от режущей кромки обрезного пуансона 5 до нижней (рабочей) поверхности съемника 11, который под дей-

ствием пружины 12 смещается вверх по конусу 13 и смыкается над вытяжным пуансоном с плотно охватившей его обрезанной деталью 14. Диаметр рабочего отверстия съемника в этом положении соответствует диаметру вытяжного пуансона.

При обратном ходе прессы обрезанный торец детали 14 всей площадью упирается в съемник, и происходит съем. Верхний край вытяжного пуансона скруглен, чтобы исключить задевание съемника и матрицы при обратном ходе.

Описанная конструкция штампа обеспечивает надежность съема при любой толщине стенки. Кроме того, воздействие съемника по всему торцу обрезанной детали при значительном усилии съема обеспечивает повышение качества торца, так как осаживаются все неровности и заусенцы.

Надежность съема детали «на провал» обеспечивает лучшие условия для автоматизации технологии изготовления полых изделий, чем съем с обратной выдачей изделия.

Еще одним преимуществом штампа является выполнение обрезки без введения обрезной кромки в рабочий поясик вытяжной матрицы и в съемник, что увеличивает стойкость и режущей кромки, и вытяжной матрицы.

Принцип действия описанного штампа может быть реализован в любых конструкциях штампов для вытяжки со складкодержателем или без него, на прессах простого или двойного действия, на первом или последующем переходе по прямой или реверсивной схеме, а также для протяжки.

Как отмечалось выше, схема вытяжки через две матрицы целесообразна и на первом переходе комбинированной вытяжки и на последующих.

На рис. 76 показана конструкция штампа для первого перехода вытяжки без складкодержателя, производимого на прессе двойного действия из предварительной вырубленной заготовки. Хотя в штампе осуществляется вытяжка заготовки с относительной толщиной $s_D = 1,6\%$, когда нет опасности складкообразования, имеется складкодержатель, который выполняет только функцию направляющего (центрирующего) устройства. Особенностью данного штампа является замкнутая система центрирования штампа и заготовки и «плавающие» рабочие части матриц из твердого сплава, расположенные на расчетном расстоянии друг от друга.

Вследствие расчетного расстояния между матрицами вытяжной пуансон с вытянутой в верхней матрице заготовкой «ловит» нижнюю «плавающую» матрицу, когда край заготовки еще находится во вставке 5 верхней матрицы 4. Съем изделия производится с помощью шарнирных съемников 8, подпружиненных со стороны нижней плиты 7.

Опыты по исследованию точности толщины стенок деталей при комбинированной вытяжке через две матрицы показали примерно одинаковое рассеивание размеров по диаметру и тол-

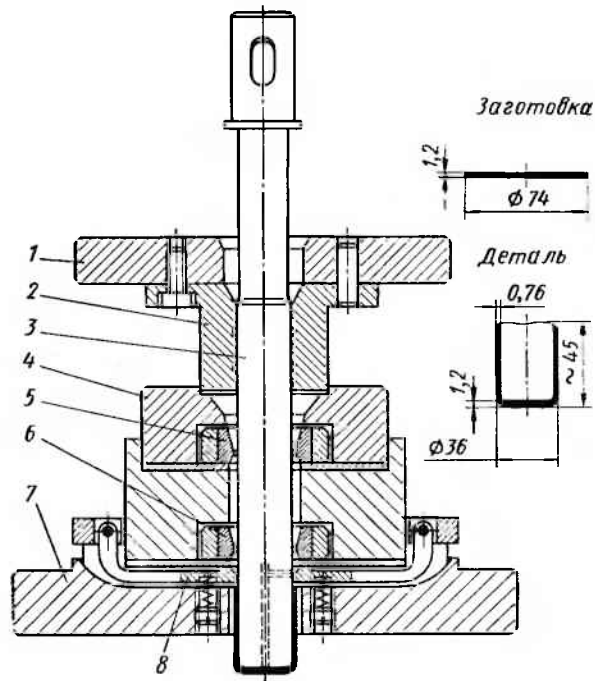


Рис. 76. Штамп для первого перехода комбинированной вытяжки через две матрицы на прессе двойного действия:

1 — верхняя плита; 2 — центрирующая втулка; 3 — вытяжной пуансон; 4 — верхняя матрица; 5 — твердосплавная вставка; 6 — нижняя матрица; 7 — нижняя плита; 8 — съемник

щине стенки изделий, полученных на штампах с жестким креплением фиксатора и обеих матриц и с жестким креплением фиксатора, но плавающими верхней и нижней матрицами. Можно, по-видимому, успешно использовать оба вида крепления. Преимущество плавающих матриц в простоте сборки штампа и замене вышедших из строя матриц. Недостатком их, как показал опыт внедрения, является засорение предусмотренных зазоров и ухудшение вследствие этого условий «плавания».

5. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕССОВОМУ ОБОРУДОВАНИЮ

Исследования и опыт внедрения комбинированной вытяжки показывают, что этот метод имеет более высокий технический уровень как по схеме деформации, так и по показателям производительности и точности по сравнению с традиционными методами.

Это предъявляет более высокие требования не только к конструкциям штампов, качеству их изготовления, прессовому оборудованию, но и к культуре производства при вытяжке вообще.

И хотя комбинированная вытяжка успешно выполняется на универсальных механических прессах с числом ходов от 20 до 120 в минуту и на гидравлических прессах, однако скорость перемещения ползуна вытяжных прессов необходимо рассчитывать с учетом теплового баланса в системе заготовка — инструмент, так как большое тепловыделение при значительных степенях деформации комбинированной вытяжки затрудняет работу на быстроходных прессах в связи с перегревом штампа и ухудшением контактных условий.

Для широкого внедрения технологических процессов глубокой вытяжки с принудительным утонением и для увеличения надежности работы штампов необходимо улучшить некоторые характеристики прессов.

Для этого необходимо:

- 1) более точное направление ползуна;
- 2) реверс ползуна в любой момент хода;
- 3) широкая гамма универсальных прессов с различными усилиями и большим ходом ползуна (200—500 мм);
- 4) увеличение жесткости станин прессов;
- 5) самоустанавливающееся крепление верхней плиты штампа (или вытяжного пуансона) во внутреннем ползуне прессов двойного действия;
- 6) принудительная циркуляция технологической смазочно-охлаждающей жидкости;
- 7) регулирование скорости перемещения ползуна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баудер У. Глубокая вытяжка пустотелых изделий из толстых листов. Пер. с нем. Сб. переводов «Проблемы современной металлургии», № 2, М., Изд-во иностр. лит., 1952, с. 93—110.
2. Бебрис А. А., Гольдберг Д. Н. Технология совмещенной реверсивной глубокой вытяжки с утонением стенки алюминиевых изделий. Рига, Латвийский ИНИИ, 1968, 29 с.
3. Буркин С. П., Тарновский И. Я., Леванов А. П. и др. Исследование контактных напряжений при вытяжке с утонением стенки. — «Кузнечно-штамповочное производство», 1970, № 7, с. 18—20.
4. Бурьев К. Н. Металлические шильфоны. М., Машгиз, 1963, 163 с.
5. Вайнтрауб Д. А. Технологические расчеты при вытяжке высоких прямоугольных деталей. ЛДНТП, 1969, 28 с.
6. Валиев С. А. О возможности штамповки тонкостенных изделий с большой толщиной дна. Сб. «Обработка металлов давлением», Тула, Изд-во Тульского политехнического института, 1971, с. 237—245.
7. Валиев С. А. Противозадирная смазка для вытяжки стальных деталей. — «Вестник машиностроения», 1957, № 6, с. 38, 39.
8. Валиев С. А. Новые принципы построения технологического процесса глубокой вытяжки. — Сб. «Глубокая вытяжка листовых материалов», Вып. 1. ЛДНТП, 1963, с. 3—20.
9. Валиев С. А., Ревне И. П. Технологические расчеты и обоснование рациональных параметров инструмента для глубокой вытяжки. — Сб. «Глубокая вытяжка листовых материалов». Вып. 1. ЛДНТП, 1963, с. 21—39.
10. Валиев С. А. Комбинированная глубокая вытяжка деталей с утонением стенок. ЛДНТП, 1965, 26 с.
11. Валиев С. А., Шевелев В. В., Яковлев С. П. Глубокая вытяжка по комбинированной схеме. — «Кузнечно-штамповочное производство», 1966, № 2, с. 14—17.
12. Валиев С. А., Шевелев В. В., Яковлев С. П. Комбинированная вытяжка тонколистового материала. — «Кузнечно-штамповочное производство», 1966, № 12, с. 18—21.
13. Валиев С. А. Деформация анизотропного материала при комбинированной вытяжке с утонением. — Сб. «Технология машиностроения», вып. 1. Тула, Приокское книжное изд-во, 1967, с. 129—136.
14. Валиев С. А. Некоторые вопросы методики расчета двухоперационной технологии комбинированной вытяжки. — Сб. «Прогрессивная технология глубокой вытяжки листовых материалов». Тула, Приокское книжное изд-во, 1968, с. 124—137.
15. Валиев С. А. К методике проектирования рабочих частей штампов для комбинированной вытяжки. — Сб. «Прогрессивная технология глубокой вытяжки листовых материалов». Тула, Приокское книжное изд-во, 1968, с. 137—149.
16. Валиев С. А., Махортов Д. Е. Опыт внедрения комбинированной глубокой вытяжки изделий средних размеров. — Сб. «Достижения и пути развития горячей и холодной штамповки и прессования», МДНТП, 1968, с. 153—161.
17. Валиев С. А. О колебаниях размеров деталей, получаемых глубокой вытяжкой. — Сб. «Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением». Тула, Приокское книжное изд-во, 1968, с. 278—285.
18. Горинев Е. П. Опыт внедрения комбинированной вытяжки с утонением стенок алюминиевых деталей средних размеров. — Сб. «Прогрессивная технология глубокой вытяжки листовых металлов». Тула, Приокское книжное изд-во, 1968, с. 119—124.
19. Гоффман О. и Закс Г. Введение в теорию пластичности для инженеров. Пер. с англ. Под ред. Э. И. Григолюка. М., Машгиз, 1957, 279 с.
20. Губанова Г. А. Выбор оптимального варианта технологического процесса холодной штамповки. ЛДНТП, 1958, 19 с.
21. Губанова Г. А. Опыт внедрения комбинированной вытяжки. — Сб. «Прогрессивная технология глубокой вытяжки листовых материалов». Тула, Приокское книжное изд-во, 1968, с. 100—109.
22. Давыдов Ю. П., Покровский Г. В. Листовая штамповка легированных сталей и сплавов. М., Оборонгиз, 1962, 200 с.
23. Зубцов М. Е. Листовая штамповка. Л., «Машиностроение», 1967, 504 с.
24. Кузнецов В. П. О глубокой вытяжке через две матрицы изделий из тонколистового материала. — «Кузнечно-штамповочное производство», 1968, № 3, с. 19—22.
25. Лисицын В. Д., Губанова Г. А., Андреева В. Н., Блинова Л. С. Анализ состояния процесса вытяжки квадратных и прямоугольных коробчатых деталей. — Сб. «Глубокая вытяжка листовых материалов». Вып. 3, ЛДНТП, 1963, с. 3—21.
26. Малов А. Н. Технология холодной штамповки. М., «Машиностроение», 1971, 564 с.
27. Михаленко Ф. П., Дурандин М. М. Установки для применения распыленных смазочно-охлаждающих жидкостей в разделительных операциях листовой штамповки. — «Кузнечно-штамповочное производство», 1970, № 6, с. 21—23.
28. Недорезов В. Е. Глубокая вытяжка листового металла. М.—Л., Машгиз, 1949, 104 с.
29. Норицын И. А. К вопросу о технологических параметрах штамповки. Труды МАМН. — Сб. «Исследование процессов штамповки и их технологических параметров». Вып. 4, М., Машгиз, 1955, с. 5—18.
30. Обозов И. П. Экспериментальное исследование процесса свертки с утонением стенки. — Труды Тульского механического института. Вып. 14, М., Госгортехиздат, 1959, с. 90—102.
31. Основы теории обработки металлов давлением. Под редакцией М. В. Сторожева. М., Машгиз, 1959, 539 с.
32. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки. М., «Машиностроение», 1968, 283 с.
33. Ревне И. П., Иванова Э. А., Кузнецов В. П. Неравномерность деформаций и механических свойств по толщине стенки при вытяжке с утонением. — «Кузнечно-штамповочное производство», 1969, № 2, с. 21—25.
34. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. М., «Машиностроение», 1971, 782 с.
35. Смирнов-Аляев Г. А., Вайнтрауб Д. А. Холодная штамповка в приборостроении. М., Машгиз, 1963, 435 с.
36. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. М., «Машиностроение», 1971, 424 с.
37. Теория и практика обработки металлов давлением. Под ред. С. И. Губкина. Государственное издательство. Минск, 1936, с. 164.
38. Чертавский А. К. Трение и смазка при обработке металлов. М., Металлургиздат, 1955.
39. Шевелев В. В., Яковлев С. П., Валиев С. А. О фестонообразовании при комбинированной вытяжке. — «Кузнечно-штамповочное производство», 1968, № 7, с. 23—25.

40. Шевелев В. В., Яковлев С. П., Ренне И. П. Изменение толщины края заготовки при вытяжке анизотропного материала.—Сб. «Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением». Тула, Приокское книжное изд-во, 1968, с. 123—131.

41. Шофман Л. А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки. М., «Машиностроение», 1964, 375 с.

42. Элер Г. Листовой металл и его испытание. Пер. с нем. М., Mashgiz, 1958, 282 с.

43. Элер, Кайзер. Вырубные гибочные и вытяжные штампы. Пер. с нем. М., Mashgiz, 1961, 396 с.

44. Novotný I. Cesty ke zvýšení koeficientu tažení při hlubokém tažení válcových nádob z plechu. «Strojrenství», 1959, N 4.

45. Oehler G. Die prüfung von Blechen und Bändern auf ihre Tiefziehfähigkeit, Hamburg-Brno, 1965.

46. Pásek V. a kol Pokrokově způsobu tváření. SNTL, Praha, 1964.

47. Sachs G. Principles and methods of sheet metal fabricating, 1951.

48. Shawki Galal S. A. Tiefziehen ohne Blechhalter in Ziehwerkzeugen mit verschiedenen Einlaufformen (I). «Bänder, Bleche Rohre», 1969, N 10.

49. Screnk K.-H. Optimale Werkzeuggestalten beim Tiefziehen ohne Niederhalter mit konischen Ziehringen. «Fertigungstechnik u. Betrieb», 1964, N 1.

50. Siebel E. u. Weiss H. Untersuchungen über das Abstrecken «Mitt. Forsch. Gesellschaft Blechverarbeitung», 1954, N 11.

51. Siebel E. u. Kotthaus H. Untersuchung über den Einfluß der Ziehspaltweite auf den Formänderungsverlauf und die Eigenspannungen Beim Tiefziehen. «Mitt. Forsch. Gesellschaft Blechverarbeitung», 1954, N 8.

Садык Абдулович ВАЛИЕВ

**КОМБИНИРОВАННАЯ ГЛУБОКАЯ ВЫТЯЖКА
ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Редактор изд. *Н. С. Степанченко.*

Техн. редакторы *Л. А. Макарова, Л. Т. Зубко*

Корректор *А. А. Снастина*

Обложка художника *В. Б. Торгашова*

Сдано в набор 28/VIII 1973 г. Подписано к печати 19/X 1973 г. Т-15786 Формат 60×90¹/₁₆
Бумага № 2 Печ л. 11,0 Уч.-изд. л. 11,0 Тираж 8000 экз. Зак. 519 Цена 56 коп.

Издательство «МАШИНОСТРОЕНИЕ», 107885, Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3.

Московская типография № 6 Союзполнграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.

56 коп.



«МАШИНОСТРОЕНИЕ»