

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением»

ТЕХНОЛОГИЯ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-36 01 05
«Машины и технология обработки материалов давлением»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области машиностроительного оборудования и технологий*

Минск
БНТУ
2021

УДК 621.73.043.016.3(075.8)

ББК 34.623я7

Т38

Рецензенты:

Ю. Л. Бобарикин, Е. Е. Петюшик

Авторы:

О. А. Шиманович, В. А. Томило, А. В. Мазурёнок, А. Н. Бельй

Т38

Технология холодной объемной штамповки : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-36 01 05 «Машины и технология обработки материалов давлением» / О. А. Шиманович [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – 51 с.

ISBN 978-985-583-303-2.

Пособие предназначено для студентов машиностроительных специальностей вузов, изучающих дисциплину «Технология холодной объемной штамповки» (специальность 1-36 01 05 «Машины и технология обработки материалов давлением»).

Издание позволяет получить теоретические знания и предусматривает развитие у студентов практических навыков по исследованию процессов холодной объемной штамповки, освоению необходимой для этого измерительной аппаратуры и штамповой оснастки.

УДК 621.73.043.016.3(075.8)

ББК 34.623я7

ISBN 978-985-583-303-2

© Белорусский национальный
технический университет, 2021

ВВЕДЕНИЕ

Основная цель учебно-методического пособия – помочь студентам глубоко усвоить курс технологической дисциплины «Технология холодной объемной штамповки», развить у них инженерное мышление, подготовив к самостоятельному решению задач в процессе практической деятельности.

Повышение точности и качества заготовок – одна из основных задач современной технологии машиностроения. Наиболее полно эта задача реализуется при использовании процессов, основанных на холодной пластической деформации. К числу наиболее прогрессивных способов, основанных на холодной пластической деформации, относятся взаимно дополняющие друг друга процессы листовой и холодной объемной штамповки.

При холодной объемной штамповке достигаются: деформационное упрочнение, отсутствие надрезов, направленность волокна вдоль конфигурации штампованной заготовки, улучшение микрогеометрии (по сравнению с обработкой резанием, литьем и горячей штамповкой), увеличение коэффициента использования металла, значительное снижение трудоемкости и станкоемкости. Процессы характеризуются высоким уровнем механизации и автоматизации, значительно опережая процессы литья и горячей штамповки.

Дальнейшее расширение области применения холодной объемной штамповки вместо обработки резанием, а также литья и горячей штамповки может быть достигнуто улучшением эксплуатационных свойств, усложнением формы, увеличением абсолютных размеров (массы) штампуемых деталей.

Задача будущего специалиста – выбрать наиболее оптимальный вариант технологии, конструкцию инструмента, параметры оборудования.

1. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

Технологический процесс получения деталей холодной объемной штамповкой основан на способности деформироваться в холодном состоянии большой группы машиностроительных материалов.

Основной особенностью холодной штамповки является то, что она осуществляется со скоростями, существенно превышающими скорости фазовых превращений, которые приводят к разупрочнению материала заготовки и релаксации напряжений. В результате деформируемый материал существенно упрочняется. Это, с одной стороны, создает проблему обеспечения прочности инструмента и ограничивает класс деформируемых материалов, с другой, позволяет в ряде случаев исключить последующую упрочняющую термообработку и использовать более дешевые конструкционные материалы.

Перечень материалов, поддающихся деформированию в условиях холодной деформации, велик, однако номенклатура материалов, действительно обрабатываемых по этой технологии большими промышленными партиями, ограничивается сплавами на основе алюминия, меди и никеля, а также, в основном, низкоуглеродистыми сталями.

Идеальными материалами для холодного выдавливания являются свинец и олово, имеющие температуру рекристаллизации близкую к комнатной, и, следовательно, они не подвержены ни деформационному, ни термическому упрочнению. Именно поэтому, несмотря на их высокую стоимость, данные материалы применяются для изготовления всевозможных туб, причем тубы олова используют только для упаковки такой продукции, для которой стоимость упаковки не имеет значения. В последнее время олово и свинец в этих случаях заменяют алюминием повышенной чистоты.

Алюминий и алюминиевые сплавы

Алюминиевые сплавы – наиболее подходящий для холодного выдавливания материал.

Алюминиевые сплавы можно разделить на два класса: термически не упрочняемые и термически упрочняемые, различающиеся механической прочностью и способами упрочнения. В первом случае повышение служебных свойств осуществляют только за счет

деформационного упрочнения при холодном деформировании. К данной категории термически не упрочняемых относят алюминий повышенной чистоты (99,9 % Al), а также технически чистый алюминий (99,25 % Al, остальное – примеси железа и кремния). Вследствие того, что алюминий повышенной чистоты дорогой, а прочность его невысока, в промышленности чаще применяют алюминий технической чистоты А5 (99,5 % Al), А7 (99,7 % Al) и А0 (99 % Al).

Таблица 1.1

Рекомендуемая степень деформации при выдавливании

Алюминий и его сплавы	Прямое выдавливание, %	Обратное выдавливание, %
АО	95	90
АД, АД1, АМц, АМг	90	85
Д1, АМг5	80	75
В95	60	50

В случае необходимости в изделиях с улучшенными механическими характеристиками применяются термически не упрочняемые сплавы, повышение прочности которых достигается за счет легирования (образования структуры твердого раствора). Основными легирующими добавками в этих сплавах являются марганец (АМц) и магний (АМг).

Так, сплавы системы алюминий-марганец АМц содержат обычно 1,3 % Mn.

Термически упрочняемые сплавы обладают более высоким сопротивлением деформированию, поэтому они применяются в случаях, когда прочность имеет существенное значение. К таким сплавам относятся сплавы системы алюминий-медь-магний Д1 (классический дуралюмин: Cu – 4,3 %, Mg – 0,6 %, Mn – 0,6 %) и сплавы системы алюминий-цинк-магний-медь В95 (дуралюмин повышенной пластичности: Cu – 4,2 %, Zn – 6 %, Mg – 2,45 %, Mn – 0,4 %).

В процессе холодного выдавливания алюминиевых сплавов удается получить высокие степени обжатия. Поэтому для получения даже весьма сложных деталей обычно применяют технологию с одной операцией выдавливания (исключая случаи местной формовки

элементов, которые принципиально нельзя получить за один переход выдавливания).

Медь и сплавы на ее основе

Медь и сплавы на ее основе также поддаются холодному деформированию, но давление, необходимое для этого, обычно выше, чем при выдавливании алюминия.

Таблица 1.2

Рекомендуемая степень деформации при выдавливании

Медь и ее сплавы	Прямое выдавливание, %	Обратное выдавливание, %
М1, М2, М3, Л90	85	80
Л62, Л68, Л70, ЛН65-5, БрА5, БрБ2	75	70
МН19, МНЦ15-20	75	70

Бескислородная медь (М00бк – 99,99 % Cu, М0бк – 99,97 % Cu, МБ – 99,97 % Cu) хорошо выдавливается и поддается другим способам холодного деформирования (раскатке, сферодвижной штамповке и др.). Она используется в электронной и электротехнической отраслях машиностроения, а также для производства медных втулок топливной аппаратуры дизельных двигателей.

Хорошо деформируются однофазные медные сплавы:

- латунь Л90 (90 % Cu, 10 % Zn), Л70 (70 % Cu, остальное Zn), Л68, Л62, ЛН65-5 (65 % Cu, 5 % Ni, остальное Zn);
- бронза БрА5 (95 % Cu, 5 % Al);
- мельхиор МН19 (19 % Ni, до 1 % Fe, остальное Cu);
- нейзильбер МНЦ15-20 (15 % Ni, 20 % Zn, остальное Cu);
- монель НМЖМц28-2,5-1,5 (28 % Cu, 2,5 % Fe, 1,5 % Mn).

Монель применяется для изготовления деталей арматуры газовых баллонов высокого давления и крепежных деталей, нейзильбер – для деталей приборов электротехнических изделий.

Удовлетворительно обрабатываются в условиях холодной деформации сплавы меди с серебром и никелем, а также бериллиевая бронза БрБ2 (Be – 2 %, Ni – 0,5 %, остальное – медь и олово).

Никель и сплавы на его основе

Чистый никель (Н1 – 99,93 % Ni и Н2 – 99,8 % Ni) и некоторые сплавы на никелевой основе поддаются холодному деформированию.

Таблица 1.3

Рекомендуемая степень деформации при выдавливании

Никель и его сплавы	Прямое выдавливание, %	Обратное выдавливание, %
Н1, Н2	75	70
НМЖ Мц 28-2,5-1,5	40	35

Железо и стали

Наибольшее распространение в машиностроении получили детали и изделия из сталей.

Таблица 1.4

Рекомендуемые суммарные степени деформации при выдавливании

Марка стали	Прямое выдавливание, %	Обратное выдавливание, %
05, 05кп	75	70
08кп, 08, 10кп, 10	70	60
20, 25, 30, 15Х, 20Х	65	55
20Г, 30Х, 35Х, 15ХФ, 20ХФ, 15ХМ	60	50
25Г, 38ХА, 20Г2, 35Г2	50	40
18ХГ, 30ХМ, 18ХГТ, 40Х, 45Х	40	–

Для холодного деформирования используют в основном низкоуглеродистые и борсодержащие стали, легированные хромом и марганцем. Содержание углерода в них, как правило, не превышает 0,35 %, причем с увеличением его количества растет скорость

упрочнения при холодном пластическом деформировании. Наибольшее распространение получили низкоуглеродистые стали, раскисленные алюминием, отличающиеся пониженным содержанием серы, фосфора и практически не включающие кремния. Легирование хромом несколько повышает прочность сталей и не уменьшает их пластичности. Низкоуглеродистые хромистые стали с добавками бора, который увеличивает прокаливаемость, успешно деформируются в холодном состоянии, как и стали, легированные марганцем. Рост содержания углерода приводит к увеличению сопротивления пластическому деформированию при одновременном уменьшении пластичности, поэтому стали с содержанием углерода более 0,35 % имеют ограниченное применение для холодной штамповки и обычно деформируются в горячем состоянии.

Кроме перечисленных материалов применяют холодное деформирование таких редких металлов, как бериллий, магний, молибден, ниобий, титан, серебро, цирконий и его сплавы. Эти материалы имеют достаточно узкое применение и для общего машиностроения не представляют практического интереса. Однако при выборе варианта изготовления деталей из редких сплавов не следует забывать о возможностях малоотходной технологии, тем более, что рациональное расходование таких материалов связано с серьезными дополнительными затратами.

Контрольное задание

- 1) выбрать из ряда материалов, предложенных преподавателем, те, которые могут обрабатываться методами холодной объемной штамповки;
- 2) используя справочную литературу указать их химический состав;
- 3) пояснить влияние легирующих элементов на их свойства, такие как прочность, пластичность, прокаливаемость и т. д.;
- 4) указать рекомендуемые степени деформации.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

На величины удельного и полного усилия оказывает влияние ряд факторов, к числу которых относятся:

- физическая природа штампуемого материала (содержание основных компонентов и примесей, структура, состояние и др.);
- кинематика движения инструмента и деформируемого металла (обратное выдавливание, прямое, радиальное и т. д.);
- степень деформации при выдавливании и ее равномерность;
- условия трения;
- форма, размеры, качество поверхности деформирующих частей инструмента (матрицы, пуансона, оправки и т. д.);
- тепловой эффект при деформации и его влияние на структуру деформируемого металла и условия трения;
- скорость деформации.

Сила отрезки и обрезки в штампе

При отрезке материала параллельными ножами:

$$P = f\sigma_B,$$

где f – площадь среза;

σ_B – предел прочности.

При отрезке листового или полосового материала наклонными ножами (на ножницах):

$$P = 0,5 \frac{s^2}{\operatorname{tg}\varphi} \sigma_B,$$

где s – толщина материала;

φ – угол наклона ножа (обычно равен $2-5^\circ$).

При формообразовании граней болта путем обрезки сегментов у цилиндрической головки:

$$P = 1,15 \left(\frac{a}{H} - 1 \right) naH\sigma_B,$$

где a – ширина грани головки болта;

H – высота головки болта;

n – число граней у головки болта.

Сила, необходимая для осуществления процессов осадки, контурной осадки и рельефной чеканки $P = pF$.

При осадке заготовки произвольной формы в плане максимальное давление:

$$p = \beta \sigma_s \left(1 + 0,4\mu \frac{\sqrt{F}}{H} \right),$$

где σ_s – предел текучести;

β – коэффициент Лоде ($\beta = 1-1,15$);

F – площадь поперечного сечения заготовки;

H – высота заготовки;

μ – коэффициент трения (со смазочным материалом укрупнено $\mu \approx 0,1$).

При холодной контурной осадке осаживается не вся заготовка, а только ее участок (фланец), лежащий на матрице. Центральная часть заготовки, углубляющаяся в полость матрицы, не изменяет свою первоначальную толщину h_0 . Для этого должно быть выдержано условие:

$$\frac{b-d}{2h} \leq \frac{1}{\mu} \left(u + \mu \frac{h_0 - h}{h} \right),$$

где b – наибольшая ширина детали;

d – диаметр центральной части (выступа) детали;

h – толщина фланца;

u – безразмерная величина, равная 0,35–0,42.

Давление при контурной осадке:

$$p = \left[1 + \mu \left(0,5 \frac{\sqrt{F}}{h} + \frac{f}{F} \right) \right] \beta \sigma_s,$$

где F – площадь осаженой части заготовки (фланца);

f – боковая поверхность центральной части заготовки в полости матрицы (выступа).

Деформация относительная и логарифмическая определяется по формулам:

$$\varepsilon = \ln h/h_0 = \ln F/F_0,$$

$$\psi = \frac{h_0 - h}{h_0} = \frac{F - F_0}{F},$$

причем при осадке – для всей детали, а при контурной осадке – для фланца заготовки.

При рельефной чеканке давление $p = (6...8)\sigma_B$.

За площадь F при определении усилия P следует принимать площадь, подвергаемую чеканке.

Логарифмическая и относительная деформация при прямом выдавливании и редуцировании составляет:

$$\varepsilon = \ln \frac{F}{f}, \quad \psi = \frac{F - f}{F}, \quad (2.1)$$

где F, f – площади поперечного сечения заготовки на входе в матрицу и на выходе из конического участка матрицы.

Укрупненно, давление при прямом выдавливании можно определить по формуле:

$$p = \sigma_{cp} \left(\varepsilon + 1 + \frac{4\mu L}{t} \right), \quad (2.2)$$

где σ_{cp} – усредненное напряжение текучести, равное среднему арифметическому пределу текучести исходного материала σ_{S1} и материала, упрочненного при соответствующей деформации σ_{S2} ,

$$\left(\text{т. е. } \sigma_{Scp} = \frac{\sigma_{S1} + \sigma_{S2}}{2} \right);$$

μ – коэффициент трения;

t – толщина стенки заготовки (для сплошных круглых заготовок толщина стенки $t = d$);

L – длина цилиндрической калибрующей части матрицы.

Деформация при *обратном выдавливании*, учитывающая одновременно уменьшение площади поперечного сечения, осадку дна и наличие недеформированных зон материала заготовки

$$\varepsilon_i = \ln \left[\frac{F}{F-f} \left(\frac{H'}{h'} \right)^{f/F} \right], \quad (2.3)$$

где F и f – площадь поперечного сечения матрицы (или исходной заготовки) и пуансона (или полости детали) соответственно;

D и d – их диаметры;

H и h – начальная высота заготовки и текущее значение толщины дна выдавливаемой детали;

H' и h' – начальное и текущее значения высоты очага деформации.

$$H' = h' \frac{F}{F-f}, \quad h' = 0,25D \left(1,4 - \frac{d}{D} \right).$$

Если при расчетах окажется, что $H' \geq H$, то в расчетах принимают $H' = H$ и $h' = h$, так как заготовка подвергается осадке по всей толщине.

Давление при обратном выдавливании:

$$p = \beta \sigma_S \left\{ \frac{\varepsilon_i \cdot F}{f} + 1 + \left[\frac{4(h' + b_1)(D + d)}{d^2} + \frac{d}{3h'} \right] \mu \right\}, \quad (2.4)$$

где $b_1 = (0,04 - 0,06)D$.

Сила выталкивания после высадки

Основными факторами, от которых зависит сила выталкивания, являются:

- схема деформации;
- материал и размеры заготовки;
- коэффициент трения между отштампованной заготовкой и стенками матрицы;

– давление, действующее со стороны отштампованной заготовки на стенки матрицы;

– упругие свойства выталкивающего стержня.

Ориентировочно сила выталкивания стержневых деталей равна

$$P_{\text{выт}} = p\mu\pi dl_{\text{рас}},$$

где $p \approx 0,8\sigma_t$;

$\mu \approx 0,15$;

d – диаметр стержня;

при $l/d \leq 5$ $l_{\text{рас}} = l$ – длина стержня; при $l/d > 5$ $l_{\text{рас}} = 5d$.

Потребная сила выдавливания рабочих полостей штампов и пресс-форм зависит от:

- механических свойств деформируемого материала;
- общей деформации (глубины полости);
- размеров заготовки;
- формы изготавливаемой полости;
- вида и размеров облегчающей камеры;
- способа выдавливания;
- условий контакта.

Деформирующую силу можно снизить поэтапным деформированием с извлечением пуансона из заготовки после каждого этапа и возобновлением смазывания пуансона и поверхности рабочей полости. Если необходимо значительно уменьшить силу штамповки, между этапами деформирования заготовку отжигают, предохраняя поверхность рабочей полости от окисления. Эффективным способом снижения силы служит применение облегчающих камер. Камеры изменяют характер течения материала, уменьшают деформацию и гидростатическое давление. Недостатком применения большинства камер является снижение пластичности материала заготовки.

Основные виды облегчающих камер:

– верхняя для закрытого, полузакрытого и открытого выдавливания с коэффициентом $k_0 = 0,5-0,9$;

– нижняя для закрытого, полузакрытого и открытого выдавливания с коэффициентом $k_0 = 0,8-0,9$;

– боковая для закрытого выдавливания с коэффициентом $k_0 = 0,8-0,9$;

– угловая для закрытого выдавливания с коэффициентом $k_0 = 0,9-0,94$;

– сквозная для закрытого и полузакрытого выдавливания с коэффициентом $k_0 = 0,38-0,85$.

Сила закрытого выдавливания:

$$P = pfk_0,$$

где p – давление пуансона;

f – наибольшая площадь поперечного сечения внедренной части пуансона.

Давление пуансона p рассчитывается с помощью достаточно сложных и громоздких математических зависимостей.

Давление при внедрении цилиндрического пуансона с плоским торцом в заготовку из низкоуглеродистой стали можно также определить по эмпирической формуле

$$p = 2,08(1 + \mu)(\text{НВ}) \sqrt[3]{\frac{h}{d}},$$

где НВ – твердость материала заготовки по Бринеллю.

Для деталей с полостями, имеющими в поперечном сечении форму круга или прямоугольника с отношением сторон $a \leq 1,5b$ целесообразно использовать цилиндрическую заготовку. Диаметр D заготовки следует назначать в зависимости от отношения глубины внедрения пуансона h к его диаметру d и способа выдавливания согласно рекомендациям, приведенным в справочной литературе. Для пуансонов некруглой формы за диаметр необходимо принимать диаметр описанной окружности.

В случае изготовления полости прямоугольной формы с отношением сторон $a > 1,5b$ заготовка должна иметь форму прямоугольника. Имея чертеж полуфабриката пресс-формы, можно вычислить высоту H заготовки из условия равенства объемов заготовки и полуфабриката. Если полость неглубокая ($h \leq 0,5d$), высоту заготовки можно назначить равной высоте полуфабриката, т. к. приращение высоты вследствие образования полости в этом случае небольшое.

3. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ВЫДАВЛИВАНИЯ

Одним из основных критериев оценки процесса формоизменения является величина напряжений и их распределение на поверхности контакта металла с инструментом. Важнейшими факторами, влияющими на напряжение при выдавливании, служат степень деформации, профиль матрицы и пуансона, а также их геометрические характеристики.

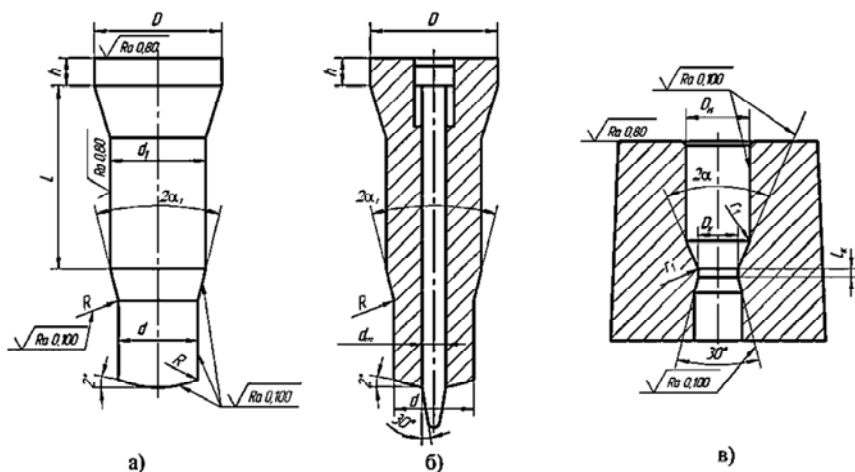


Рис. 3.1. Рабочий инструмент для прямого выдавливания:
а – пуансон для сплошных деталей; *б* – пуансон со скользящей оправкой
 для полых деталей; *в* – матрица

При прямом выдавливании рабочим инструментом являются пуансон, оправка и матрица (рис. 3.1).

Пуансоны для прямого выдавливания можно подразделить на пуансоны без оправок и пуансоны с оправками для получения сплошных и полых деталей соответственно. Пуансоны должны быть как можно короче и иметь плавные переходы; торцовая поверхность, воспринимающая нагрузки, должна быть несколько скошена под углом 1–2°, чтобы улучшить схему деформирования. Размер d принимается по размеру контейнера матрицы так, чтобы

обеспечивался зазор между ними, равный 0,2–0,5 мм для компенсации упругих деформаций сжатий у пуансона. Остальные размеры рекомендуются принимать из следующих соотношений: $D = (1,1–1,5)d$; $R = 0,1d$; $h = 5–15$ мм; $L = (1,5–2,5)d$; $2\alpha_1 = 60^\circ$.

Оправки применяют для ограничения радиального течения металла и получения полости заданных поперечных размеров. Применять сплошные пуансоны с оправкой нецелесообразно, т. к. во время выдавливания оправка под действием изгибающих и растягивающих напряжений стремится оторваться от пуансона. Гораздо большей стойкостью обладают составные конструкции. Наиболее оптимальной из них является составной пуансон с подвижной оправкой (рис. 3.1, б). Торцы пуансона и поверхность оправки шлифуют и полируют. Для облегчения извлечения оправки из заготовки ее рабочую часть, если это допускается конструкцией штампуемой детали, нужно делать конической с углом 30° .

Матрица для прямого выдавливания имеет цилиндрическую заходную полость (которая служит для установки заготовки), рабочую полость для придания детали соответствующей формы и нижнюю полость, обеспечивающую направление выдавленной детали (рис. 3.1, в).

Высота заходной полости определяется требуемой высотой заготовки и величиной предварительного захода пуансона в матрицу перед выдавливанием, которая назначается в пределах 5–10 мм. Большая высота заходной полости приводит к увеличению сил трения в начальный момент штамповки и значительному увеличению давления на пуансоне. Поэтому рекомендуется, чтобы отношение высоты заходной полости к ее диаметру не превышало 10.

Рабочая полость состоит из переходной части от цилиндрической заходной части к формообразующему пояску и из самого пояска. Геометрия переходной части влияет на силу выдавливания, распределение деформаций и скоростей по сечению и контактные условия.

Для получения сплошных деталей обычно применяют матрицы, имеющие коническую переходную часть с углом при вершине $2\alpha = 70–90^\circ$, а для прямого выдавливания полых деталей – $2\alpha = 60^\circ$, что обеспечивает технологичность изготовления и достаточно равномерное и плавное распределение нагрузки в процессе выдавливания, необходимое для увеличения продолжительности срока службы матрицы. При уменьшении угла 2α до 30° возникают большие

напряжения на боковых стенках матрицы, возможно полное снятие смазочного материала с поверхности заготовки. Увеличение угла 2α до $160\text{--}180^\circ$ вызывает рост давления (рис. 3.2).

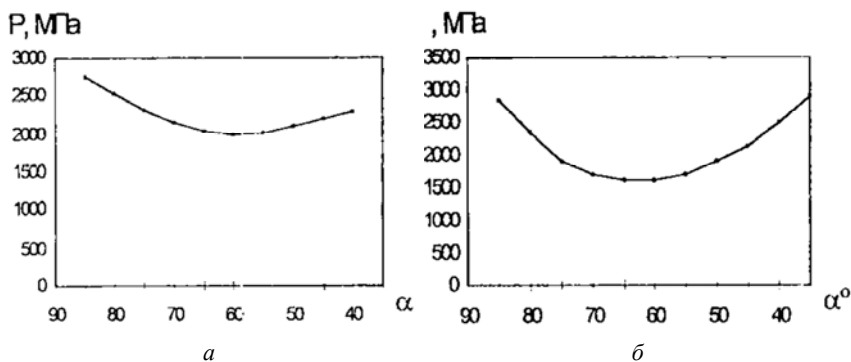


Рис. 3.2. Влияние угла конуса матрицы на давление при прямом выдавливании стали:
 а – сплошного стержня; б – полый детали

Важный фактор, определяющий стойкость матрицы – радиус r_1 перехода от цилиндрической части в коническую и от нее к рабочему пояску. Его выполняют для уменьшения трения и давления на инструмент, обычно $r_1 = 0,1D_M$. Высоту рабочего пояска обычно выбирают в пределах $3\text{--}7$ мм или $L_k = 0,2D_M$. Диаметры L_k , D_M назначают по минимально допустимым размерам готовых деталей. Если выдавливаемая часть деталей имеет значительную длину, то на некотором расстоянии от калибрующего пояска предусматривают направляющий поясок с размером $D = D_k + 0,1$ мм с целью обеспечения прямолинейности поверхности выдавливаемой детали.

Существуют два основных способа выдавливания: прямое и обратное. При прямом выдавливании истечение металла происходит в направлении, совпадающем с движением пуансона. При обратном выдавливании истечение металла заготовки относительно боковых стенок матрицы происходит в направлении, противоположном движению пуансона.

Все виды выдавливания характеризуются одинаковой механической схемой: напряженное состояние – трехосное неравномерное сжатие, деформированное состояние – одно удлинение и два сжа-

тия. По сравнению с другими видами обработки давлением (прокатка, осаживание и др.) при выдавливании имеет место значительно большее гидростатическое давление сжатия, благодаря чему основные показатели штампуемости (пластичность и сопротивление деформированию) увеличиваются.

Процесс выдавливания в общем случае состоит из трех стадий. Первая стадия – распрессовка заготовки, при которой происходит заполнение полости штампа до соприкосновения металла со всей поверхностью рабочего инструмента, включая калибрующую часть. Усилие и величина гидростатического давления по длине рабочего хода интенсивно увеличиваются (рис. 3.3). При получении конических и сферических внешних поверхностей, зубьев шестерен и других подобных элементов деталей процесс заполнения полости штампа на этой стадии заканчивается.

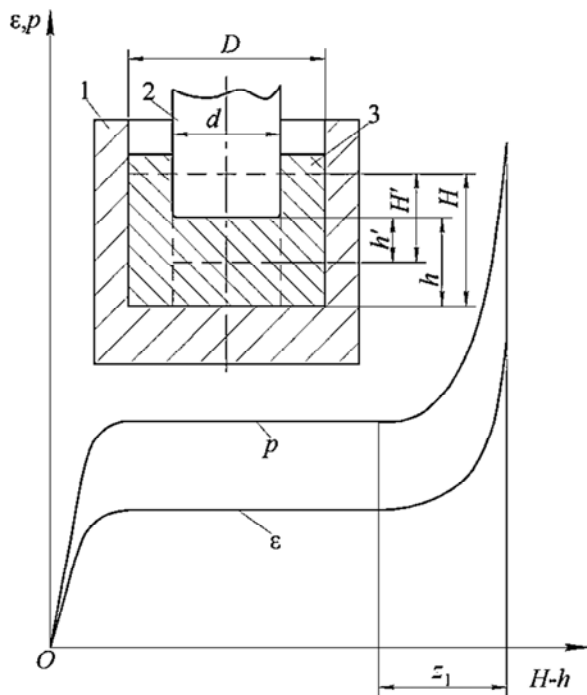


Рис. 3.3. Схема обратного выдавливания и кривые изменения деформации ϵ и давления p :

1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – заготовка

Вторая стадия – установившаяся стадия, при которой происходит ламинарное течение металла. Усилие по длине рабочего хода пуансона либо сохраняется постоянным, либо незначительно уменьшается. Высота образующейся пластической зоны при прямом истечении составляет $\approx 0,7R$, при обратном $\approx 0,5R$. В большинстве случаев при изготовлении деталей с постоянным и ступенчатым сечением на этой стадии выдавливания процесс заканчивается.

Третья стадия – заключительная нестационарная стадия, при которой происходит турбулентное движение металла. Эта стадия наступает, когда расстояние между пуансоном и матрицей (длина невыдавленной части заготовки) соизмеримо с высотой пластической зоны при установившемся процессе. Скорость деформации, интенсивность скольжения по всем рабочим поверхностям инструмента, неравномерность деформации резко возрастают, и, соответственно, увеличиваются усилие выдавливания и гидростатическое давление. Образуются центральные и боковые пресс-утяжины, возрастает вероятность разрушения (скола) вдоль границ раздела течения.

Методом обратного выдавливания получают полые изделия круглой, квадратной, прямоугольной, овальной и других форм (гильзы, колпачки, стаканы и другие трубчатые детали с гладкой и ступенчатой поверхностью).

Обратное выдавливание характеризуется высокими давлениями и сложными условиями работы пуансона. Часть первоначальной торцевой поверхности заготовки вдавливается и образует дно стакана, при этом под торцом пуансона появляется небольшая коническая область недеформированного металла. Одновременно другая часть металла выдавливается в зазор между пуансоном и матрицей, образуя стенки стакана, и претерпевает весьма большие пластические деформации без образования трещин. Во время выдавливания материал под пуансоном течет вдоль образующих конуса недеформированного металла и формирует стенки стакана. При действии высоких напряжений коническая область недеформированного металла уменьшается по высоте и размывается. Особенно это заметно, когда дно стакана становится тонким.

При обратном выдавливании деталей типа стакана рабочим инструментом являются пуансон, выталкиватель (нижний пуансон) и матрица.

Пуансоны для обратного выдавливания несут нагрузку на 20 % большую, чем при других схемах штамповки с одинаковой относительной деформацией. Напряженное состояние рабочей части пуансонов зависит от конструктивного оформления головки пуансона: радиусов переходов, угла конусности торца, наличия и относительного диаметра площадки в центре торца головки и др.

Оптимальный график торца головки пуансона (рис. 3.4) должен обеспечить сохранение промежуточного слоя (носителя смазочного материала) на всем пути выдавливания полости. В наибольшей степени этому условию удовлетворяют пуансоны с конусностью торца с углом при вершине $2\alpha = 160\text{--}175^\circ$. При необходимости получения плоского дна детали используются пуансоны с плоским торцом и закругленными кромками. Пуансоны с малой конусностью и с плоским торцом не нарушают фосфатное покрытие, сохраняют смазочный слой на заготовке, и поэтому усилие возрастает плавно. Пуансоны с шаровидным концом или с конусной поверхностью с углом при вершине менее 150° при малых деформациях обеспечивают низкие давления; при относительной деформации более 60 % они разрушают смазочный слой, создают условия для интенсивного скольжения смазочного материала вверх по сторонам, что приводит не только к резкому увеличению давления, но и к нарушению устойчивости технологического процесса в целом.

Для снижения сил трения по цилиндрическому участку рабочей части пуансона высоту участка ограничивают образованием рабочего пояска. Уменьшение высоты пояска до 1–3 мм снижает давление и не ускоряет износ пуансона.

В типовой конструкции пуансона для обратного выдавливания (рис. 4) размер пояска d назначают по максимально и минимально допустимому размеру полости; остальные размеры:

$$2\alpha \geq 150^\circ; d_1 = (0,2 - 0,5)d; D \approx 2d; l_k = (2 - 3) \text{ мм}; r_1 = 0,1d;$$

$$h = 5 - 15 \text{ мм}; z = 0,05 - 0,15 \text{ мм}; 2\alpha_1 = 40^\circ - 60^\circ.$$

Матрицы для обратного выдавливания выполняют с верхней частью и полостью, соответствующей форме и размерам получаемой детали (рис. 3.4). В нижнюю часть полости устанавливают выталки-

ватель, торцовая поверхность которого является дном или частью дна. Если в дне детали не предусматривается получение фасок и уступов, матрица имеет гладкую сквозную полость. Стенки сквозной рабочей полости выполняют строго цилиндрическими или для облегчения выталкивания – с углом $\approx 1^\circ$. Величина уклона зависит от толщины стенки детали, высоты заготовки и требуемой точности. Глубина рабочей полости матрицы определяется высотой заготовки, которая при загрузке в матрицу должна быть ниже верхнего ее торца не менее чем на 5 мм.

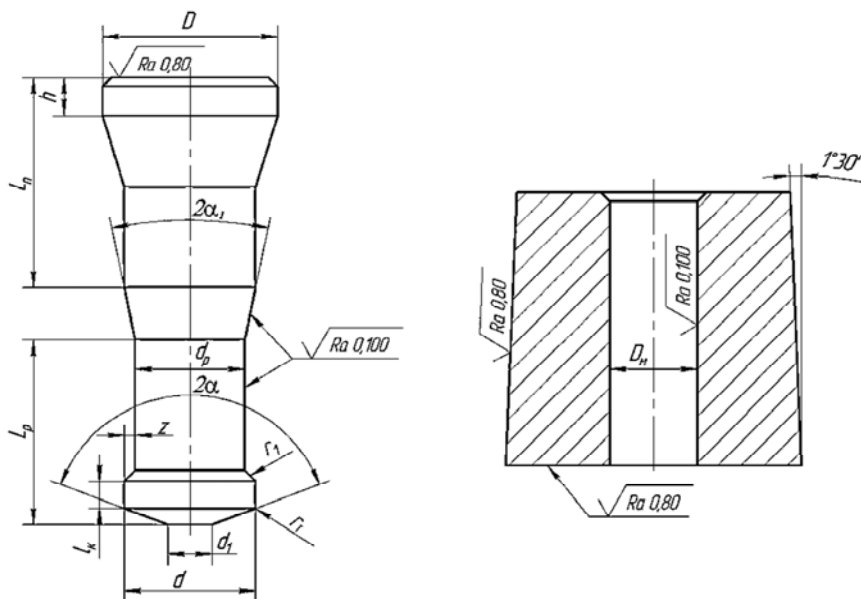


Рис. 3.4. Типовые конструкции пуансона и матрицы для обратного выдавливания

Деформация при обратном выдавливании, сопровождающемся деформационным упрочнением, учитывающая одновременно уменьшение площади поперечного сечения, осадку дна и наличие недеформированных зон материала заготовки (рис. 3.3), определяется по формуле (2.3).

Лабораторная работа «Исследование влияния геометрических параметров деформирующего инструмента на силовые характеристики процесса прямого холодного выдавливания»

Цель работы: ознакомиться с конструкцией деформирующего инструмента для выдавливания; изучить зависимости давления на инструмент от его геометрических параметров и формы.

Материалы, инструмент, оборудование. Работа выполняется на универсальной испытательной машине в штампе со сменными матрицами. Сменные матрицы с различными углами конуса ($2\alpha = 90^\circ, 120^\circ, 140^\circ, 150^\circ$) имеют следующие размеры: рабочий размер цилиндрической калибрующей части $d = 15$ мм; длина рабочего пояса $L_k = 10$ мм.

Цилиндрические образцы диаметром 39 мм и высотой 35 мм изготавливаются из свинца, смазка – технический вазелин. Размеры матриц и образцов измеряются штангенциркулем.

Выполнение работы. Измерить рабочие размеры матрицы. Установить матрицу в штамп и закрепить ее. Продавить образец до выхода стержня из отверстия матрицы, определив по силоизмерителю испытательной машины усилие выдавливания. Сменить матрицу, повторить опыты выдавливания в матрицах с различными углами конуса.

Рассчитать усилие деформации для конических матриц по следующим уточненным формулам.

Давление, передаваемое на пуансон, $p = p_1 + p_2$, где p_1 – давление, вызванное трением при перемещении заготовки в приемнике матрицы; p_2 – давление, необходимое для деформации и преодоления сил трения в конической части матрицы и калибрующем пояске.

$$p_1 = \sigma_S^* \cdot \frac{\mu 4H}{D_M},$$

где $\sigma_S^* = \beta \sigma_{cp}$, $\beta = 1-1,15$ – коэффициент Лоде;

σ_{cp} – усредненное напряжение текучести, равное среднему арифметическому пределу текучести исходного материала и материала, упрочненного при соответствующей деформации;

μ – коэффициент трения;

H – высота заготовки.

$$\rho_2 = \sigma_S^* \left[\frac{\mu 4L_k}{D_k} + \left(\frac{2}{1 + \cos \alpha} + \frac{1}{2 \sin \alpha} \right) \ln \frac{F}{f} \right],$$

где α – угол конуса матрицы;

F – площадь поперечного сечения приемника матрицы или заготовки на входе в матрицу;

f – площадь поперечного сечения заготовки на выходе из конического участка матрицы.

Максимальное усилие выдавливания

$$P = p \cdot F_{\Pi},$$

где F_{Π} – площадь рабочей части пуансона.

Все расчетные и экспериментальные данные поместить в таблицу:

Диаметр, мм		Степень деформации ϵ	Высота рабочего пояса L_k , мм	Угол конуса матрицы 2α , град.	Усилие выдавливания P , экспериментальное, кН	Усилие выдавливания P , расчетное, кН	Давление, передаваемое на пуансон, p , МПа	Давление в приемнике матрицы p_1 , МПа	Давление в конической части матрицы p_2 , МПа
заготовки D	детали d								

По полученным данным построить график зависимости усилия выдавливания от угла конусности матрицы.

Лабораторная работа «Изучение зависимости энергосиловых параметров процесса прямого холодного выдавливания от степени деформации»

Цель работы: ознакомиться с процессом прямого холодного выдавливания; изучить зависимости усилия при прямом выдавливании от степени деформации.

Теоретические сведения. Процесс холодного выдавливания основан на использовании пластических свойств металлов и сплавов и представляет собой формоизменение заготовки путем всестороннего сжатия металла с истечением его наружу в незамкнутую полость штампа.

Изготовление деталей методом холодного выдавливания сокращает время обработки, снижает процент брака и дает возможность получать изделия точные по размерам и с высокой чистотой поверхности. Основным недостатком процесса – низкая стойкость инструмента, обусловленная значительным усилием деформирования.

В качестве исходного материала для получения изделий методом холодного выдавливания используют цветные металлы и их сплавы, малоуглеродистые и низколегированные стали, а также некоторые другие материалы.

Существует три основных метода выдавливания: прямое, обратное и комбинированное. Они различаются между собой направлением течения металла относительно движущегося деформирующего пуансона. При прямом выдавливании материал перемещается в одном направлении с движением пуансона, а при обратном – в противоположном направлении. В случае комбинированного выдавливания металл течет одновременно как в направлении движения пуансона, так и в противоположном направлении.

Методы холодного выдавливания применяются для изготовления деталей типа стержней, полых изделий различных форм, в т. ч. с отрезками разного профиля.

На величины удельного и полного усилия при выдавливании оказывает влияние ряд факторов, к числу которых относятся: физическая природа обрабатываемого материала (содержание основных компонентов и примесей, структура и т. д.); кинематика движения инструмента и деформируемого металла (обратное выдавливание, прямое и т. д.); степень деформации при выдавливании и ее равно-

мерность; условия трения; форма, размеры, качество поверхности деформирующих частей инструмента (матрицы, пуансона и т. д.); тепловой эффект при деформации и его влияние на структуру деформируемого металла и условия трения; скорость деформации.

Множественность действующих на усилие выдавливания факторов и их сложная взаимосвязь при выдавливании привели к тому, что для определения усилия предложено значительное количество весьма громоздких и сложных формул. Расчеты по ним затруднительны вследствие сложности количественной оценки указанных факторов в каждом конкретном случае. В такой ситуации целесообразно обратиться к экспериментальному графику рабочих нагрузок при выдавливании (изменение усилия в течение процесса). Этот график (индикаторная диаграмма) дает возможность определить требуемое усилие в любой момент перемещения ползуна прессы в течение всего рабочего хода, а кроме того, планиметрированием площади диаграммы можно получить требуемые затраты энергии для данной операции.

Рассматривая типовую индикаторную диаграмму (график рабочих нагрузок) для случая прямого холодного выдавливания детали стержневого типа (рис. 3.5), можно выделить отдельные фазы протекания процесса.

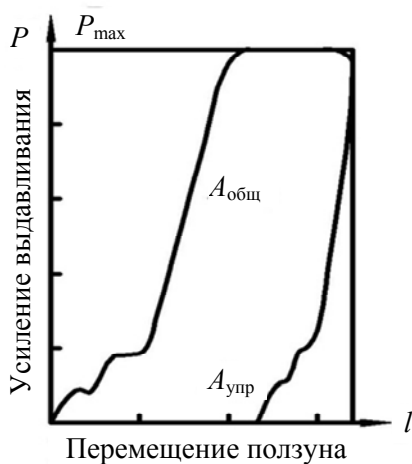


Рис. 3.5. Типовой график рабочих нагрузок при выдавливании

В начальный период пуансон начинает деформировать заготовку в упругой области, при этом одновременно упруго нагружаются инструмент и элементы пресса (перед этим под действием усилия выбираются зазоры между отдельными элементами пресса и штампа). Первые колебания кривой усилия на графике указывают на преодоление сил трения во всей системе, затем усилие растет до величины P_{\max} , достаточной для создания условий пластической деформации заготовки в данных конкретных условиях, т. е. наступает пластическое течение. При этом усилие может оставаться постоянным, несколько снижаться вплоть до окончания процесса (вследствие нагрева детали и снижения потерь на трения) или повышаться (из-за неблагоприятных условий трения и искажения очага деформации). Окончание процесса пластического деформирования детали, продолжительность которого устанавливается величиной перемещения ползуна, приводит к снятию напряжения во всей системе. Здесь также наблюдаются зигзагообразные колебания кривой, которые объясняются разгрузкой в каких-либо элементах системы и не имеют никакого отношения к изменению усилия непосредственно в процессе деформирования. Площадь диаграммы между вертикалью и нисходящей частью кривой соответствует работе упругой деформации $A_{\text{упр}}$, которая при обратном ходе ползуна теряется.

По графику рабочих нагрузок можно установить максимальное требуемое усилие, длину хода ползуна, на котором выполняется рабочая операция, характер изменения требуемого усилия в функции перемещения ползуна, общие затраты энергии, необходимые для осуществления процесса, выбрать пресс для соответствующей операции.

Материалы, инструмент, оборудование. Работа выполняется на универсальной испытательной машине в штампе со сменными матрицами, который представлен на рис. 3.6.

Сменные матрицы имеют следующие размеры: рабочий диаметр цилиндрической калибрующей части $d = 15, 20$ и 30 мм; длина калибрующей части $L = 10$ мм; угол конуса матрицы $2\alpha = 160^\circ$. В штампе установлен пуансон диаметром $38,8$ мм.

Цилиндрические образцы диаметром 39 мм и высотой 35 мм изготавливаются из свинца, смазка – технический вазелин. Размеры матриц и образцов измеряются штангенциркулем.

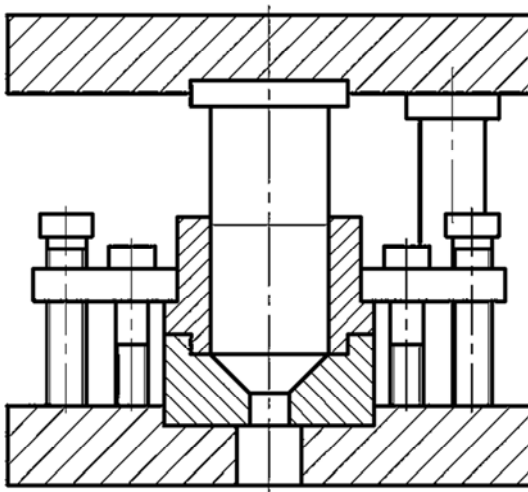


Рис. 3.6. Схема штампа для прямого холодного выдавливания

Выполнение работы. Измерить рабочие размеры матрицы. Установить матрицу в штамп и закрепить ее. Продеформировать образец до выхода стержня из отверстия матрицы (рис. 3.7), зафиксировав ход ползуна и определив максимальное усилие выдавливания по силоизмерителю машины, одновременно получить индикаторную диаграмму. Сменить матрицу, повторить опыты выдавливания детали в матрицах различных размеров.

Результаты опытов заносятся в таблицу:

Диаметр, мм		Степень деформации, ϵ	Усилие выдавливания P экспериментальное, кН	Усилие выдавливания P расчетное, кН		Длина калибрующей части L , мм	Давление, МПа	
заготовки D	изделия d			приближенное	уточненное		приближенное	уточненное

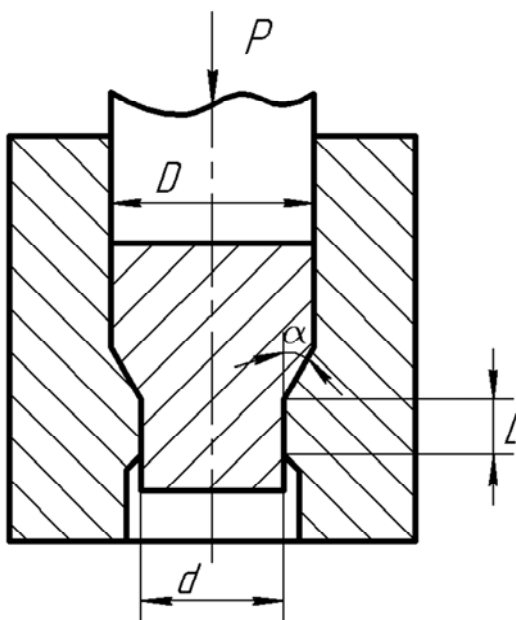


Рис. 3.7. Схема прямого выдавливания из сплошной заготовки

Логарифмическая деформация при прямом выдавливании определяется по формуле (2.1).

Приближенно давление при прямом выдавливании можно определить по формуле (2.2).

Более точные результаты дают расчеты величины давления при прямом выдавливании по следующей формуле:

$$p = \sigma_{\text{ср}} \cdot \varepsilon \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2\alpha}{3\varepsilon} \right) + \frac{\pi D H \mu \sigma_{\text{ср}}}{F},$$

где α – угол конусности матрицы;

D и H – диаметр и высота заготовки.

Максимальное усилие выдавливания:

$$P = p \cdot F_n,$$

где F_n – площадь рабочей части пуансона.

Предположив, что усилие постоянно, получим выражение для определения требуемой работы выдавливания:

$$A = P \cdot h,$$

где h – ход, совершаемый пуансоном при деформировании (можно считать $h = l$, т. е. ход пуансона и ход ползуна равны).

По результатам опытов и расчетов строятся графики зависимости усилия выдавливания от степени деформации, делается анализ полученных зависимостей. Сравниваются экспериментальные значения давления с расчетными. На основании полученных индикаторных диаграмм дается заключение о величине работы деформации и строится график зависимости работы деформирования от степени деформации.

Лабораторная работа «Экспериментальное и теоретическое определение усилия обратного выдавливания»

Цель работы: ознакомиться с конструкцией деформирующего инструмента для обратного выдавливания и методикой определения усилия процесса; изучить зависимости удельного давления при обратном выдавливании от степени деформации.

Материалы, инструмент, оборудование. Работа выполняется на универсальной испытательной машине. В качестве инструмента используется штамп (рис. 3.8) с набором пуансонов, диаметр рабочей части которых равен 17, 22, 24 мм и матрицей диаметром 30 мм.

Пуансон 2 крепится в башмаке 12 с помощью конического кольца 3 и гайки 4. Матрица 5 запрессовывается в бандаж 9 и своей выступающей частью опирается на подкладное кольцо 8. Выталкивание штамповки из матрицы производится толкателями 6 и 7. При застревании штамповки на пуансоне съем ее осуществляется съемником 11.

Цилиндрические образцы диаметром 30 мм и высотой 50 мм изготавливаются из свинца.

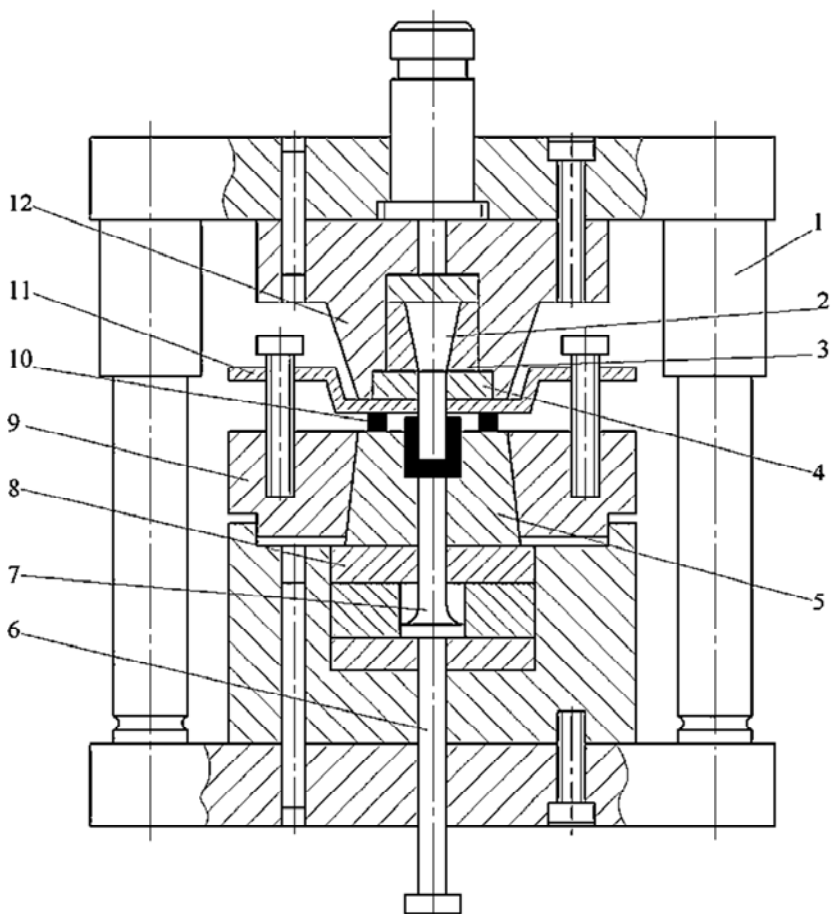


Рис. 3.8. Штамп для холодного выдавливания:
 1 – направляющая втулка; 2 – пуансон; 3 – коническое кольцо
 для крепления пуансона; 4 – гайка; 5 – матрица; 6, 7 – толкатели;
 8 – подкладное кольцо; 9 – бандаж; 10 – упорное кольцо;
 11 – съемник; 12 – башмак

Выполнение работы. Обратное холодное выдавливание производится без смазки до момента получения изделия (стакана), толщина дна которого должна быть не меньше толщины стенки. В процессе опытов фиксируется максимальное усилие выдавливания по силоизмерителю машины. Результаты опытов заносятся в таблицу.

№ ПП	Диаметр, мм		Степень деформации ϵ_1	Усилие, кН		Удельное давление, МПа	
	пуансона	заготовки		расчетное	экспериментальное	расчетное	экспериментальное

Рассчитывается степень деформации и давление на пуансон по формулам (2.3) и (2.4) соответственно.

По результатам опытов и расчетов строится график зависимости удельного давления от степени деформации, делается анализ полученной зависимости.

4. ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРЯМОМ ВЫДАВЛИВАНИИ

Процессы прямого выдавливания характеризуются значительной неравномерностью деформации по сечению. На распределение деформаций и кинематику течения металла оказывают влияние силовые условия процесса, прочностные и пластические свойства выдавливаемого материала, контактное трение, форма инструмента (профиль рабочей части матрицы); степень и скорость деформации, масштабный фактор.

Исследование характера течения металла при выдавливании показывает, что весь объем деформируемой заготовки можно разделить в общем случае на три зоны: зону упругой деформации, пластическую (или очаг деформации) и застойные или «мертвые» зоны. На рис. 4.1 показана схема расположения зон в заготовке.

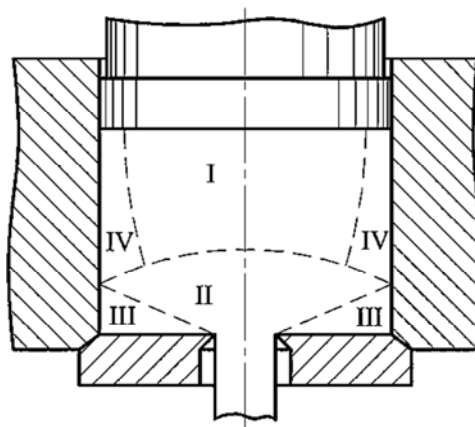


Рис. 4.1. Зоны деформации заготовки при выдавливании:
I – упругая зона; II – очаг деформации; III – «мертвые» зоны;
IV – приконтактный деформированный слой

Размеры зон и их расположение зависят от многих факторов. Например, при выдавливании через конические матрицы с достаточно малыми углами конусности «мертвых» зон может вообще не быть. Иногда пластическая зона распространяется на весь объем прессуемого металла, и тогда упругая зона практически отсутствует.

Чем больший объем заготовки захватывается пластической зоной, тем больше необходимые усилия прессования.

Конфигурация пластической зоны, показанная на рис. 4.1, встречается в практике прессования довольно редко, потому что, как правило, существует много факторов, приводящих к появлению дополнительных участков, охваченных пластической деформацией. Одним из главных факторов является трение между боковой поверхностью заготовки и стенкой матрицы, которое приводит к затормаживанию движения периферийных слоев металла тем в большей мере, чем больше удельные силы трения. Трение может достичь такой величины, что произойдет полное прилипание периферийных слоев и, следовательно, скорость их перемещения будет равна нулю.

Затормаживание периферийных слоев приводит к появлению в них интенсивных деформаций сдвига, что требует дополнительных энергозатрат. Чем выше уровень трения, тем интенсивнее торможение, тем в большем объеме развиваются сдвиги (зона IV), тем больше величина сдвиговых деформаций в приконтактном слое и тем больше разница в степени деформации осевых и периферийных участков заготовки, образующих осевую и периферийную зоны поперечного сечения изделия.

Для изучения характера течения металла при обработке давлением применяют различные методы, позволяющие оценить как качественную картину, так и количественные значения деформации в различных точках обрабатываемой заготовки. Наибольшее распространение получил метод координатной сетки. Сущность метода заключается в том, что деформируемый образец разрезают вдоль оси от одной из диаметральных плоскостей (плоскости симметрии) пополам и на одну половину наносится координатная сетка с постоянным шагом. После этого обе половинки заготовки складывают и деформируют совместно. При выдавливании делают недопрессовку, образец разъединяют и по изменениям сетки судят о характере и величине деформации в различных точках заготовки.

Приняв протяженность линии, на которой расположены деформированные элементы в очаге течения, за путь формоизменения l , а длину участков этой линии, соответствующих положению одного элемента координатной сетки, за этап формоизменения dl , можно на каждом этапе замерить деформации в направлении принятых осей (рис. 4.2).

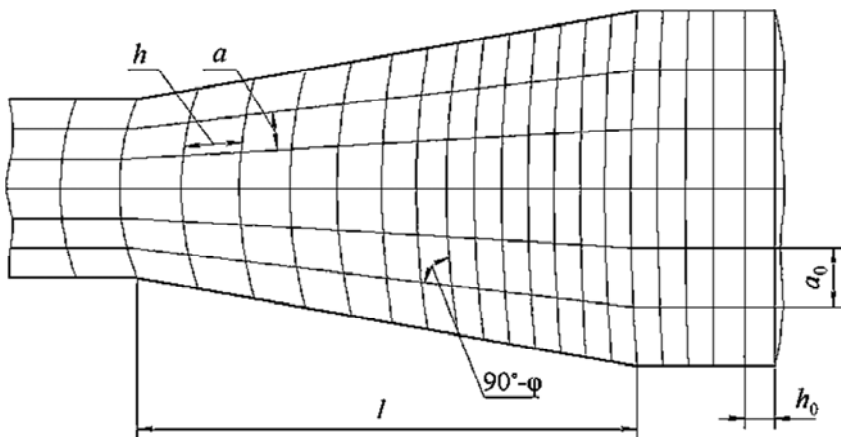


Рис. 4.2. Искажение координатной сетки

Замеряемые деформации определяются выражениями

$$l_{xx} = \ln \frac{h_0}{h}, \quad l_{yy} = \ln \frac{a_0}{a}, \quad l_{xy} = \operatorname{tg} \varphi,$$

где l_{xx} , l_{yy} – точная линейная деформация элемента, происходящая в плоскости симметрии в направлении оси x и y ;

l_{xy} – точная угловая деформация элемента в плоскости симметрии; h_0 , h – размер элемента координатной сетки в направлении оси x до деформации и на данном ее этапе;

a_0 , a – то же в направлении оси y ;

φ – угол искажения первоначального прямого угла элемента на данном этапе деформации.

Изменение координатной сетки при прямом выдавливании сплошного стержня приведено на рис. 4.3.

Из рассмотрения этой сетки видно, что деформация при выдавливании отличается значительной неравномерностью. Продольные прямые дважды претерпевают изгиб – у входа в обжимаемую зону и у выхода из нее. При этом углы изгиба уменьшаются от периферии к центру.

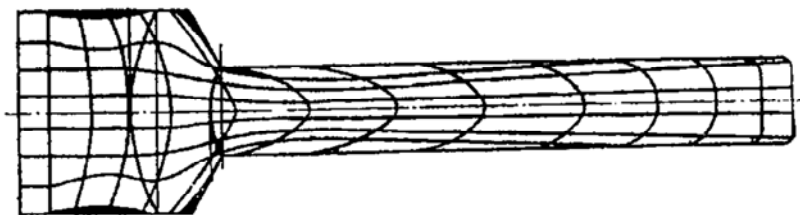


Рис. 4.3. Типовая схема координатной сетки при выдавливании круглого прутка

Изгиб продольных линий начинается до плоскости входа в обжимающую часть пластической зоны; изгибы на выходе из зоны деформации образуются до плоскости выхода. Следовательно, со стороны входа в зону деформации и выхода из нее пластическая зона ограничена поверхностями, обращенными выпуклостями в сторону, противоположную истечению.

Поперечные линии изгибаются, принимая форму, близкую к параболической; эти линии выпуклостью направлены в сторону истечения. Кривизна этих линий и расстояние между ними увеличиваются от переднего конца прутка к заднему.

Исходные квадратные ячейки координатной сетки в процессе деформации искажаются, принимая форму, близкую к прямоугольникам на оси заготовки, и форму параллелограммов на периферии. Острые углы параллелограммов уменьшаются от центра к периферии и от переднего конца прутка к заднему.

В углах матрицы, образованных стенками и дном, возникают «мертвые» зоны, в которых металл пластически не деформируется. Таким образом, обжимающая часть зоны пластической деформации ограничивается с передней и задней сторон поверхностями, имеющими выпуклость в сторону, обратную истечению, и сбоку – границей между пластической и упругой («мертвой») зонами, имеющей воронкообразную форму с выпуклостью в сторону упругой зоны.

В заключительной стадии процесса выдавливания пуансон приближается к обжимающей части пластической зоны. Объем металла, питающий эту зону, резко сокращается. При постоянной скорости деформирования это приводит к увеличению скорости скольжения металла по пуансону от периферии к центру. Течение слоев металла к центру вызывает переход металла с боковой поверхности

заготовки на торец, приводит к изгибу продольных волокон и к образованию в центральной части торца воронкообразного углубления – пресс-утяжины, в которой сосредоточены поверхностные дефекты заготовки.

Лабораторная работа «Изучение течения металла при прямом выдавливании»

Цель работы: изучить влияние профиля рабочей части матрицы на характер течения металла и неравномерность деформации при прямом выдавливании; освоить метод координатной сетки для оценки кинематики течения металла и количественных значений деформации в различных точках прессуемой заготовки.

Материалы, инструмент, оборудование. В работе применяются цилиндрические свинцовые образцы диаметром 39 мм и высотой 35 мм, разъемные в осевой плоскости. Для проведения работы используются универсальная испытательная машина, матрицы с различными углами конусности, приспособление для нанесения координатной сетки, отсчетный микроскоп типа МПБ-2, смазка.

Выполнение работы. Координатная сетка наносится на одну из половинок образцов, после чего они смазываются и соединяются. Образцы подвергают выдавливанию с одинаковой деформацией в матрицах с различными углами конусности.

После разъединения недопрессованных образцов производятся замеры элементов координатной сетки при помощи отсчетного микроскопа, вычисляются линейные и угловые деформации.

Путем сравнения значений деформаций, полученных с использованием матриц с различными углами конусности, делаются выводы о влиянии профиля рабочей части матрицы на характер течения металла и неравномерность деформации при прямом выдавливании.

5. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ПОПЕРЕЧНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

Как и все процессы холодного выдавливания, метод поперечного (бокового) выдавливания основан на использовании пластических свойств металлов и сплавов и представляет собой формоизменение заготовки путем всестороннего сжатия металла с истечением его наружу в незамкнутую полость штампа.

При этом процессе (рис. 5.1) матрица *1* располагается непосредственно во втулке контейнера *2* под прямым углом к оси пуансона *3*. Усилие действует на заготовку *4* в направлении ее продольной оси, а выдавливаемый металл выходит из матрицы под углом 90° к направлению движения пуансона. Поперечное выдавливание может быть одноканальным (рис. 5.1, *а*), двухканальным с расположением матриц с двух сторон контейнера (рис. 5.1, *б*) и многоканальным. Существует также схема двухстороннего выдавливания (рис. 5.1, *в*).

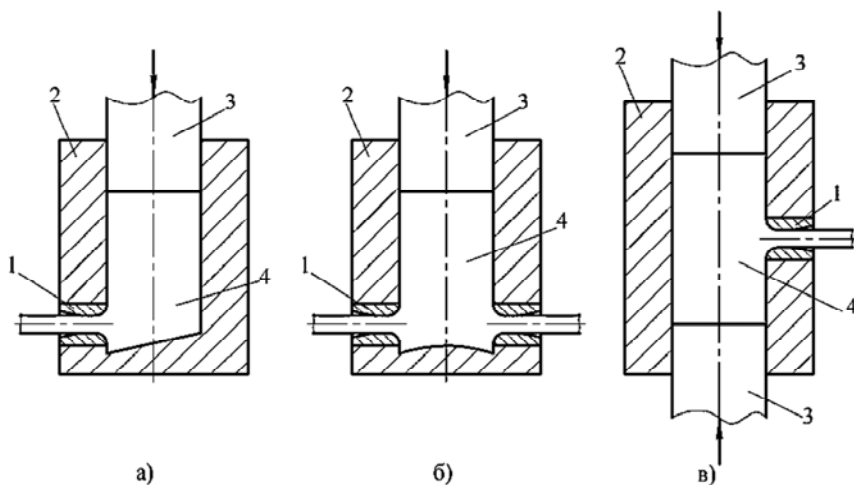


Рис. 5.1. Схема поперечного (бокового) выдавливания:
а – одноканальное; *б* – двухканальное; *в* – двухстороннее

Характер течения металла при поперечном канальном выдавливании обеспечивает минимальную разницу механических свойств изделия в продольном и поперечном направлениях. При этом де-

формация может достигать высоких значений, что повышает прочность изделий. Применение поперечного выдавливания дает возможность использовать вертикальные прессы для получения изделий максимально возможной длины.

Наибольшее распространение способ поперечного канального выдавливания нашел при изготовлении прутков и профилей из цветных металлов, свинцовых труб, тонкостенных труб из легких сплавов, биметаллических стале-алюминиевых проводов, электрокабелей, заключенных в свинцовую или алюминиевую оболочку и т. п.

В рассматриваемом процессе поперечного выдавливания по сравнению с прямым имеются две следующие особенности: наличие осевой асимметрии деформаций и повышенная вследствие этого неравномерность деформаций. Это наиболее выражено при одноканальном, менее резко – при многоканальном и еще менее резко при двухстороннем выдавливании. Еще одной особенностью процесса является то, что скорости истечения металла при выдавливании, например, через два боковых отверстия, равны (рис. 5.2)

$$v_1 = v_2 = v \cdot \lambda, \quad (5.1)$$

где v_1 и v_2 – скорости истечения металла через отверстия;

v – скорость движения пуансона;

λ – суммарный коэффициент вытяжки.

$$\lambda = \frac{F}{f_1 + f_2} = \frac{D^2}{d_1^2 + d_2^2} = \frac{R^2}{r_1^2 + r_2^2}.$$

Усилие поперечного выдавливания:

$$P = p \cdot F, \quad (5.2)$$

где p – давление на пуансоне;

F – площадь пуансона.

Давление, передаваемое на пуансон состоит из нескольких составляющих:

$$p = p_0 + p_T + p_M,$$

где p_0 – давление, необходимое для деформации;

p_T – давление, необходимое для преодоления внешнего трения при скольжении жесткой зоны по поверхности контейнера: $p_T = \frac{\sigma_S^* (H - 1,4D)\pi D}{2F}$;

p_M – давление, необходимое для преодоления трения на поверхности калибрующих поясков матрицы: $p_M = \frac{\sigma_S^* \lambda l_k \pi d}{2F}$.

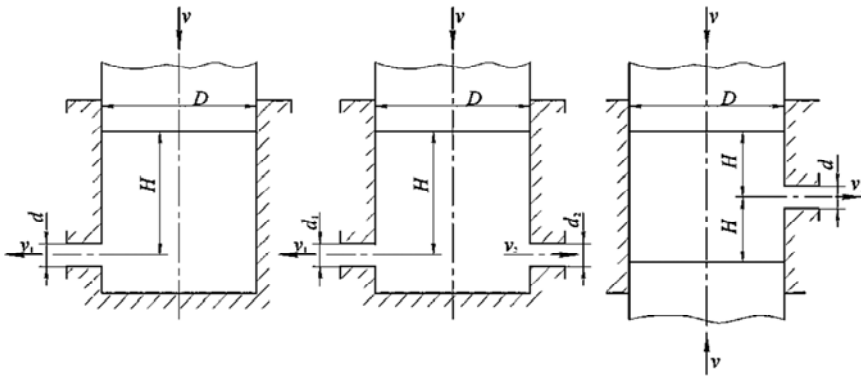


Рис. 5.2. Схемы поперечного выдавливания к расчетам скоростей и давлений

С учетом этого, формула по определению давления имеет вид

$$p = \sigma_S^* \left(0,8 + 3,4 \lg \lambda + \frac{(H - 1,4D)\pi D + \lambda l_k \pi d}{2F} \right), \quad (5.3)$$

где $\sigma_S^* = \beta \sigma_{cp}$; $\beta = 1 - 1,15$ – коэффициент Лоде;

σ_{cp} – усредненное напряжение текучести, равное среднему арифметическому пределу текучести исходного материала и материала, упрочненного при соответствующей деформации;

l_k – длина калибрующего пояaska матрицы;

H – условная высота заготовки (в расчетах величину H берут равной первоначальной).

Поскольку условная высота заготовки в процессе выдавливания постепенно уменьшается, то давление на стационарной стадии деформации должно постепенно снижаться. В случае многоканально-го выдавливания увеличение числа матриц учитывается с помощью составляющей p_m .

Также для определения полного давления при поперечном выдавливании можно использовать формулы для прямого выдавливания с добавлением слагаемого:

$$p_{\text{доп}} = \sigma_s^* \cdot D^2 \cdot 0,196 \cdot \ln \lambda.$$

При необходимости быстрого определения давления для частных условий поперечного выдавливания в инженерной практике иногда применяют номограммы, построенные на основании большого числа экспериментальных результатов (рис. 5.3). Такие номограммы позволяют найти искомое давление, не прибегая к трудоемким расчетам. Следует, однако, отметить, что полученные по номограммам значения очень приближительны.

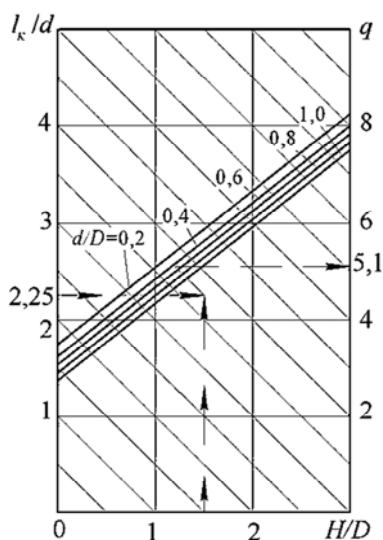


Рис. 5.3. Номограмма для определения удельных усилий поперечного выдавливания ($q = p / \sigma_s$ – удельное усилие деформирования, отнесенное к напряжению текучести), $\mu = 0,25$

Лабораторная работа «Изучение процесса поперечного выдавливания»

Цель работы: ознакомиться с процессом поперечного выдавливания длинномерных изделий; изучить методики определения энергосиловых параметров при поперечном канальном выдавливании.

Материалы, инструмент, оборудование. Работа выполняется на универсальной испытательной машине в контейнере с матрицами для многоканального выдавливания. Матрицы имеют следующие размеры: рабочий диаметр цилиндрической калибрующей части $d = 3$ мм, длина калибрующего пояса $l_k = 10$ мм.

Цилиндрические образцы диаметром 30 мм и высотой 60 мм изготавливаются из оловянно-свинцовистого сплава ПОС-61. Размеры контейнера и образцов измеряются штангенциркулем.

Выполнение работы. Измерить рабочие размеры контейнера. Установить контейнер в испытательную машину. Продавить образец до выхода стержней из отверстий матриц, определив по силоизмерителю испытательной машины усилие выдавливания. Зафиксировать скорость истечения металла через матрицы.

Рассчитать усилие деформации по формулам (5.2) и (5.3). Сравнить полученные результаты с экспериментальными и определенными с помощью номограмм. Сделать вывод о точности теоретических зависимостей и номограмм. Рассчитать по формуле (5.1) скорость истечения материала из матрицы и сравнить полученные данные с экспериментальными.

6. ОСОБЕННОСТИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕССЕ ВЫСАДКИ

Высадкой (набором металла) называется операция, в результате которой увеличивается поперечное сечение заготовки вследствие уменьшения длины ее концевой или средней части.

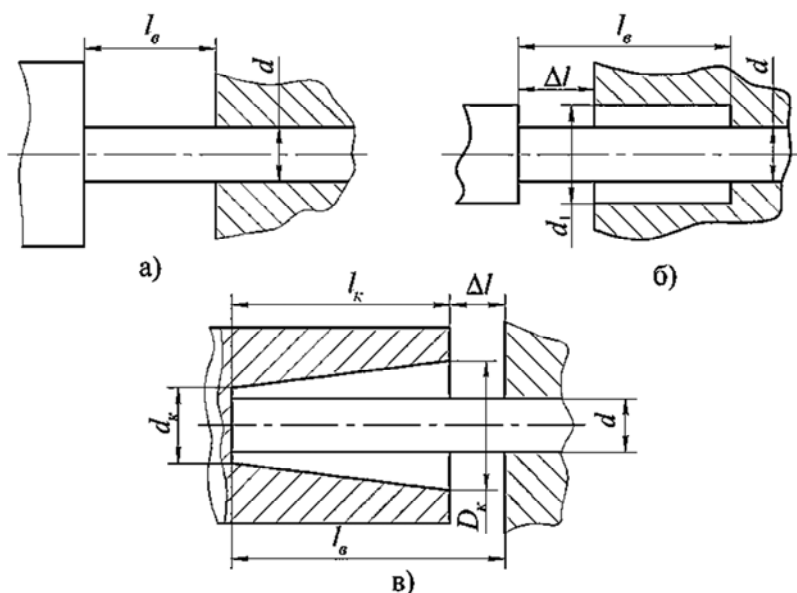


Рис. 6.1. Схема высадки:

a – на свободный диаметр плоским пуансоном; *б* – в матрице плоским пуансоном; *в* – пуансоном с конической полостью

В случае холодной объемной штамповки высадка широко применяется при работе на холодно-высадочных автоматах. Различают высадку на свободный диаметр (рис. 6.1, *a*), высадку в матрице (рис. 6.1, *б*) и набор металла в коническом пуансоне (рис. 6.1, *в*).

Устойчивость заготовки необходима для получения деталей заданной конфигурации и размеров без нежелательных изменений формы. Критерием продольной устойчивости является отношение $\alpha = l_B/d$ (l_B – длина деформируемой части заготовки; d – ее диаметр), гарантирующее деформирование заготовки без изгиба.

Продольная устойчивость зависит от факторов, которые можно объединить в две группы. К первой группе относятся: способ закрепления концов деформируемой заготовки, форма предварительного набора металла и угол конической заготовительной полости пуансона, конфигурация штампуемой детали и инструмента, смещение точки приложения деформирующей силы относительно оси заготовки, чистота среза и угол скоса торцов заготовки, искривленность оси заготовки, состояние рабочей поверхности инструмента (шероховатость, наличие смазочного материала и его вид). Ко второй группе относятся: механические свойства деформируемого металла, исходное состояние заготовки (отожженная, калиброванная и т. п.) и деформация при существовании промежуточных переходов штамповки. Наибольшее влияние на продольную устойчивость оказывают отклонение оси штампуемой заготовки от оси инструмента и угол скоса торца. Так, отклонение оси высаживаемой заготовки от оси штамповки на $0,1d$ после деформирования возрастает в 3–5 раз.

При высадке плоским пуансоном на свободный диаметр за один ход машины можно осуществить набор металла:

- при ровном и перпендикулярном к оси прутка торце $l_B \leq 3d$;
- при угле скоса торца менее 6° $l_B \leq 2,5d$;
- при угле скоса торца более 6° $l_B \leq 2d$.

Если длина высаживаемой части $l_B \leq 3d$, высадку за один ход машины можно провести в матрице (рис. 6.1, б) на диаметр $d_1 < 1,5d$.

С уменьшением зазора между полостью матрицы d_1 и прутком d опасность образования зажима уменьшается. В случае если $l_B > 3d$ и высадка производится на диаметр $d_1 = 1,5d$, то выступающая за пределы матрицы свободная часть прутка не должна превышать исходного диаметра ($\Delta l \leq d$).

Наиболее благоприятные условия набора металла обеспечивает высадка в пуансоне с конической полостью (рис. 6.1, в). Угол конуса 2β влияет на устойчивость заготовки и благоприятное течение металла достигается при $2\beta = 12\text{--}15^\circ$. Для определения размеров конической полости пуансона исходят из условия равенства объемов высаживаемой части заготовки $V_3 = \left(\pi d^2/4\right) \cdot l_B$ и конической части пуансона:

$$V_k = (\pi/12)(D_k^2 + D_k d_k + d_k^2) \cdot l_k.$$

Критерием возможности проведения высадки являются отношения $\alpha = l_b / d$ и $\psi = \Delta l / d$. Зная α и ψ , можно вычислить относительную глубину $\lambda = l_k / d$ конической части пуансона как разность $\lambda = \alpha - \psi$. При этом λ , особенно для коррозионно-стойкой стали, должно быть не меньше 0,5. Относительное увеличение меньшего диаметра конической полости $\eta = d_k / d$ принимают равным 1,0–1,05, а относительное значение большего диаметра $\delta = D_k / d$ определяют из условия равенства объемов $V_k = V_3$. Тогда

$$\delta = 1,73 \sqrt{\alpha/\lambda - (\eta/2)^2} - \eta/2.$$

Окончательные размеры конической полости пуансона:

$$l_k = \lambda \cdot d; D_k = \delta \cdot d; d_k = \eta \cdot d; \Delta l = \psi \cdot d. \quad (6.1)$$

Если после первого перехода окажется, что отношение принимает вид $2l_k / (D_k + d_k) < 3$, то следующий наборный переход не требуется.

Достаточно точные значения силы, необходимой для высадки деталей типа тел вращения, обеспечивает уравнение:

$$P_b = \sigma_s z_\phi \nu \left(1 + \frac{\mu D}{3h} \right) F,$$

где σ_s – предел текучести;

z_ϕ – коэффициент, учитывающий неравномерность напряжений, обусловленную сложностью формы высаживаемой детали; $z_\phi = 1,1$ – для симметричных деталей простой формы; $z_\phi = 1,2$ – для симметричных деталей сложной формы; $z_\phi = 1,3$ – для шестигранников, прямоугольников и для несимметричных деталей;

ν – коэффициент, учитывающий влияние механической схемы деформации, $\nu = 1,25$ – $1,75$ – большие значения принимают, когда металл затекает в углы или выдавливается в зазоры;

μ – коэффициент контактного трения для процессов высадки составляет 0,08–0,12;

D – диаметр проекции высаженной головки на плоскость, перпендикулярную к оси головки;

h – высота высаженной части детали;

F – площадь поперечного сечения высаженной части детали.

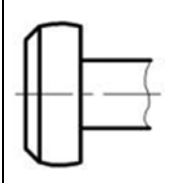
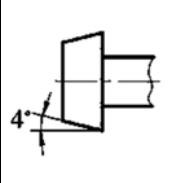
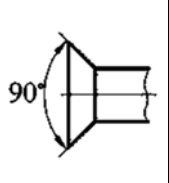
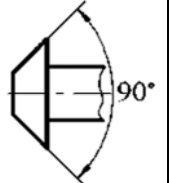
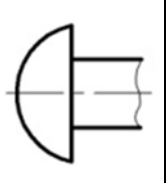
Для ориентировочных расчетов сил высадки может быть применена упрощенная формула

$$P_B \approx \frac{F \sigma_S}{\eta_F}, \quad (6.2)$$

где η_F – коэффициент, учитывающий форму головки (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Ориентировочные значения коэффициента η_F
в зависимости от формы высаженной головки

				
0,75–0,85	0,35–0,45	0,3–0,5	0,3–0,4	0,25–0,4

Лабораторная работа «Изучение формоизменения заготовки в процессе высадки»

Цель работы: ознакомиться с методикой расчета переходов высадки с точки зрения продольной устойчивости заготовок; изучить зависимости по определению усилия высадки; экспериментально проверить правила высадки плоскими пуансонами и пуансонами с конической полостью.

Материалы, инструмент, оборудование. Работа выполняется на универсальной испытательной машине. В качестве инструмента используется приспособление (рис. 6.2) со сменными пуансонами. Ци-

линдрические образцы расчетной длины диаметром 16 мм изготавливаются из свинца. Размеры образцов измеряются штангенциркулем.

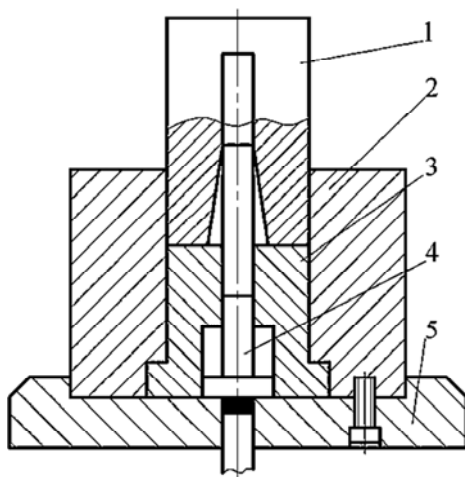


Рис. 6.2. Приспособление для осуществления высадки:

1 – пуансон; 2 – контейнер; 3 – матрица;
4 – выталкиватель; 5 – основание

Выполнение работы. В соответствии с заданием определить размеры исходной заготовки исходя из следующего. Диаметр заготовки d определяется диаметром стержня детали (принимается $d = 16$ мм). Длина всей заготовки для высадки $l_{\text{заг}} = l_{\text{в}} + l_{\text{ст}}$, где $l_{\text{ст}}$ – длина стержневой части. Длина высаживаемой части $l_{\text{в}} = 4V_{\text{заг}}^{\text{в}} / \pi d^2$, где $V_{\text{заг}}^{\text{в}}$ – объем высаживаемой части заготовки.

Рассчитать число переходов, обосновав форму рабочей поверхности пуансона. При необходимости набора в конической полости пуансона рассчитать размеры полости по формулам (6.1).

Осуществить высадку плоским пуансоном и пуансоном с конической полостью заготовок расчетной длины в экспериментальном приспособлении на испытательной машине. В процессе опытов фиксируется усилие высадки по силоизмерителю машины.

Сравнить экспериментальное усилие высадки с рассчитанным по формуле (6.2) и сделать выводы о возможностях применения различных способов высадки.

7. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СМАЗКИ НА ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

Процессы холодного объемного деформирования относятся к наиболее перспективным формообразующим процессам, находящим все более широкое применение благодаря следующим основным преимуществам перед другими процессами обработки металлов давлением:

- сокращению до минимума подготовительных операций (нагрева, обрезки облоя, калибровки и др.);
- ограничению и централизации очага деформации в зоне формоизменения;
- возможности изготовления достаточно точных деталей без последующей обработки резанием;
- высокой производительности.

Однако исключительно высокие контактные нагрузки и энергоемкость процесса, низкая стойкость инструмента приводят к необходимости интенсификации процесса в первую очередь за счет регулирования сил контактного трения.

Снижение сил контактного трения за счет применения эффективных смазок обеспечивает свободное течение металла и хорошее заполнение гравюры штампа. Объемная холодная штамповка без использования смазок либо практически невозможна, либо сопряжена с износом и низкой стойкостью штампового инструмента, а также большими энергозатратами.

Высокие удельные давления, развиваемые в процессах холодного деформирования металлов, способствуют разрушению смазочной прослойки и образованию непосредственного контакта деформируемого металла с материалом инструмента, приводя к их схватыванию. Поэтому основной функцией технологических смазок в процессах холодного деформирования металлов является надежное экранирование поверхности заготовок с целью предотвращения ее контакта с инструментом. Экранирующий эффект смазочной прослойки определяется ее способностью сопротивляться разрушению под действием высоких нагрузок и больших сдвиговых деформаций. Вторая основная функция – снижение сил трения, что является показателем антифрикционных свойств прослойки.

Экранирующая способность жидких и вязких смазок усиливается включением в их состав поверхностно-активных веществ (ПАВ), образующих на твердых поверхностях «молекулярный ворс» из полимерных молекул, имеющих сильные локальные связи с подложкой. Несущая способность смазочного слоя возрастает с применением пористых подсмазочных покрытий. В процессах холодного деформирования металлов особенно широкое распространение получило химическое фосфатирование поверхностей заготовок. Фосфатный слой имеет относительно низкий уровень сопротивления сдвигу и по структуре представляет собой пористое тело, которое, будучи пропитанным смазкой, способно выдавливать ее из пор при сжатии и сдвиге, снижая уровень сил трения в самых критических условиях.

В практике получают различные фосфатные покрытия: магниевые, железные и фосфат цинка.

Цинковые фосфатные покрытия являются наилучшими, так как, реагируя с некоторыми смазочными материалами (например, с теаратом натрия, животными жирами), образуют металлические мыла.

Фосфатные покрытия можно наносить на углеродистые и многие марки низколегированных сталей. При содержании в стали хрома >2 % нанесение данного покрытия затруднено, а фосфатная обработка хромоникелевых сталей вообще невозможна.

Специальные стали обладают большим сопротивлением деформированию, и поэтому к покрытиям предъявляют высокие требования. Так, поверхности из специальных сталей должны быть подвергнуты одной из обработок:

- 1) покрытию пластичными металлами;
- 2) кальцинированию (окунанием в суспензию $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с добавкой NaCl);
- 3) покрытию графитом или смесью графита с парапластом;
- 4) окислению.

При первом способе обработки используют электролитические методы нанесения таких металлов, как цинк, медь, кадмий, олово и др. Например, применение покрытия из сплава системы кадмий-цинк, проявляющего эффект структурной сверхпластичности при комнатной температуре, обеспечивает более низкое значение коэффициента трения по сравнению с фосфатными покрытиями и омывающими смазками.

Преимущество оксилитирования состоит в том, что в результате обработки солями угольной кислоты $C_2O_4H_2$, железа $FeC_2O_4 \cdot 32H_2O$ или фосфата марганца $Mn_3(PO_4) \cdot 37H_2O$, образуется плотное покрытие (слой) окиси железа, которое действует подобно фосфатной пленке в сочетании с омыливанием.

Эффективны пластичные смазки в виде твердых суспензий (в парафине) дисульфита молибдена, вольфрамида, графита и др.

В качестве жидких технологических смазок наиболее эффективны сульфозфрезол, укринол, В-32к и ЭМБОЛ-3, основой которых является минеральное масло с добавками ПАВ и противозадирными присадками.

Лабораторная работа «Влияние технологической смазки на силовые и качественные параметры холодной объемной штамповки»

Цель работы: изучить эффективность смазок различного происхождения и состава с точки зрения снижения усилия деформации при холодной объемной штамповке.

Материалы, инструмент, оборудование. Работа выполняется на универсальной испытательной машине. Используются медные образцы, размеры которых соответствуют размерам матрицы для выдавливания, и различные смазочные материалы.

Выполнение работы. На испытательной машине производят выдавливание круглых медных заготовок без смазки и со смазкой с регистрацией усилия деформирования. После каждого опыта эффективность смазки определяют по величине усилия деформирования.

По результатам работы сделать вывод об эффективности различных смазок с точки зрения снижения усилия деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. / ред. совет: Е. И. Семенов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 3: Холодная объемная штамповка / под ред. Г. А. Навроцкого. – 1987. – 384 с.
2. Холодная объемная штамповка : справочник / под ред. Г. А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
3. Головин, В. А. Технология холодной штамповки выдавливанием / В. А. Головин, А. Н. Митькин, А. Г. Резников. – М.: Машиностроение, 1970. – 152 с.
4. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов / С. И. Губкин. – М.: Металлургия, 1961. – Т. 1: Физико-механические основы пластической деформации. – 1961. – 376 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Материалы, применяемые для холодной объемной штамповки	4
2. Определение усилия деформирования операций холодной объемной штамповки	9
3. Геометрические особенности деформирующего инструмента для выдавливания	15
4. Особенности течения металла при прямом выдавливании	32
5. Особенности процесса поперечного выдавливания	37
6. Особенности формоизменения заготовки в процессе высадки	42
7. Влияние технологической смазки на параметры процессов холодной объемной штамповки	47
Литература	50

Учебное издание

ШИМАНОВИЧ Ольга Анатольевна
ТОМИЛО Вячеслав Анатольевич
МАЗУРЁНОК Алла Владимировна и др.

ТЕХНОЛОГИЯ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-36 01 05
«Машины и технология обработки материалов давлением»

Редактор *Н. А. Костешева*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 30.11.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 2,36. Тираж 100. Заказ 823.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.