

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА**

**А.П. Быков, В.Р. Каргин, Б.В. Каргин**

## **ПРЕССОВАНИЕ**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

**САМАРА 2010**

УДК 621.77  
ББК 34.623  
П-73

**П-73 Прессование:** учеб. пособие / *А.П. Быков, В.Р. Каргин, Б.В. Каргин.* – Самара: Изд-во Международного института рынка, 2010. – 147 с.: ил.

**ISBN 978-5-98972-051-4**

Рассмотрены общие сведения о процессе прессования металлов, характер напряженно-деформированного состояния, температурно-скоростной режим. Описаны элементы технологического процесса прессования, конструкции прессового инструмента и особенности структуры и свойств профилей. Даны методики расчета параметров прессования и инструмента. Пособие является дополнением к лекционному курсу «Основы технологических процессов ОМД. Раздел прессование».

Пособие предназначено для студентов инженерно-технологического факультета, обучающихся по специальности 150106 – обработка металлов давлением и направлению металлургия.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. А. Михеев,  
к-т техн. наук, доц. В. И. Дровяников

УДК 621.77  
ББК 34.623

**ISBN 978-5-98972-051-4**

© А.П. Быков, В.Р. Каргин, Б.В. Каргин,  
Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2010

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 4   |
| 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРЕССОВАНИИ .....                             | 7   |
| 1.1 Сущность процесса .....                                      | 7   |
| 1.2 Показатели деформации .....                                  | 10  |
| 1.3 Методы прессования .....                                     | 12  |
| 1.4 Вопросы для самоконтроля .....                               | 28  |
| 1.5 Задачи .....   | 29  |
| 2 ТЕОРИЯ ПРЕССОВАНИЯ .....                                       | 33  |
| 2.1 Стадии прессования .....                                     | 33  |
| 2.2 Течение металла на основной стадии .....                     | 40  |
| 2.3 Напряженно-деформированное состояние .....                   | 45  |
| 2.4 Силовой режим прессования .....                              | 48  |
| 2.5 Деформируемость металла при прессовании без разрушения ..... | 58  |
| 2.6 Остаточные напряжения .....                                  | 62  |
| 2.7 Вопросы для самоконтроля .....                               | 63  |
| 2.8 Задачи .....   | 65  |
| 3 ТЕХНОЛОГИЯ ПРЕССОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ .....                          | 69  |
| 3.1 Технологическая схема производства профилей .....            | 69  |
| 3.2 Выбор коэффициента вытяжки и размеров заготовки .....        | 73  |
| 3.3 Получение заготовки .....                                    | 77  |
| 3.4 Температурно-скоростные условия .....                        | 82  |
| 3.5 Структура и свойства профилей .....                          | 91  |
| 3.6 Дефекты .....  | 95  |
| 3.7 Технологическая карта .....                                  | 101 |
| 3.8 Вопросы для самоконтроля .....                               | 104 |
| 3.9 Задачи .....   | 105 |
| 4 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕССОВОГО ИНСТРУМЕНТА .....                    | 108 |
| 4.1 Состав прессового инструмента .....                          | 108 |
| 4.2 Матрица .....  | 109 |
| 4.3 Контейнер .....  | 127 |
| 4.4 Пресс-штемпель и пресс-шайба .....                           | 132 |
| 4.5 Вопросы для самоконтроля .....                               | 136 |
| 4.6 Задачи и упражнения .....                                    | 138 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....  | 144 |

## ВВЕДЕНИЕ

Прессование – один из прогрессивных и распространенных процессов обработки металлов давлением. По своему принципу он совпадает с процессом изготовления свинцовых труб, предложенным еще в 1797 г. в Англии Брэймзгом. Трубы получали из расплавленного свинца путем его вдавливания ручным насосом в трубообразную подставку с конической оправкой и последующего охлаждения.

В современном виде прессование началось с создания во Франции в 1867 г. инженером Амоном вертикального гидропресса для изготовления свинцовых труб из твердой заготовки. Прессование твердого и прочного металла освоено с 1895 г. в Германии, когда Г. Диком был построен прототип современного горизонтального гидропресса для прессования заготовок из латуни.

В настоящее время для получения длинномерных прутков, профилей, панелей и пустотелых изделий наиболее часто применяют прессование. Это объясняется:

- мелкосерийностью производства, требующей частой смены инструмента, что довольно просто осуществляется при прессовании;
- необходимостью повышения точности размеров пресс-изделий;
- сравнительно низкой вязкостью многих металлов и сплавов при повышенных температурах;
- сложностью конфигурации поперечных сечений пресс-изделий;
- благоприятной схемой напряженного состояния - всесторонним неравномерным сжатием.

Деформированное состояние при прессовании характеризуется двумя деформациями укорочения и одной деформацией удлинения. Схема напряженного состояния позволяет получать весьма высокие степени

деформации, недостижимые в других процессах обработки металлов давлением. Последние три фактора часто делают прессование единственным процессом, который позволяет получить изделие заданной формы.

Прутки и профили, панели и пустотелые изделия изготавливают прессованием практически из всех освоенных промышленностью металлов и сплавов, табл. 1. Появление алюминия - металла сравнительно мягкого, не требующего высокой температуры нагрева, открыло широкие возможности для развития прессования.

Табл. 1. Некоторые характеристики прессуемых металлов

| Параметры                             | Al  | Mg  | Ti   | Fe   | Cu   |
|---------------------------------------|-----|-----|------|------|------|
| Плотность, г/см <sup>3</sup>          | 2,7 | 1,7 | 4,5  | 7,9  | 8,94 |
| Температура плавления, С <sup>0</sup> | 660 | 650 | 1668 | 1539 | 1083 |
| Предел текучести, Мпа                 | 80  | 20  | 400  | 170  | 42   |
| Содержание в земной коре, %           | 8.8 | 2,1 | 0,57 | 4,65 | 0,01 |
| Относительная стоимость к Fe          | 6   | 8   | 90   | 1    | 7,5  |

Прессованную продукцию используют как полуфабрикат для деталей машин и агрегатов, а также как заготовки для пластической деформации штамповкой, волочением и др. Особенно это относится к профилям, так как их форма может быть любой конфигурации, что позволяет их использовать для изготовления строительных конструкций, деталей самолетов, ракет, автомобилей, а также деталей машино- и приборостроения с минимальной механической обработкой, табл. 2.

При использовании прессованных профилей и панелей в автомобиле-, вагоно-, судо-, самолетостроении удалось значительно уменьшить массу конструкций, что позволяет снизить массу основных узлов машин и агрегатов.

Табл. 2. Области использования пресс-изделий

| Область применения               | Япония | Великобритания | США |
|----------------------------------|--------|----------------|-----|
| Электропровода, шины             | 6,3    | 9,6            | 10  |
| Строительство                    | 28     | 15,4           | 30  |
| Бытовая техника                  | 1,5    | 6,8            | 15  |
| Консервирование, тара и упаковка | 5,3    | 10,3           | 8   |
| Машиностроение + авиация         | 21     | 21             | 20  |
| Транспортные машины              | 25     | 14,4           | 10  |
| Прочее + экспорт Al              | 12,9   | 22,4           | 7   |

Большое применение нашли пресс-изделия в машиностроении, точной механике, оптике, в электротехнической промышленности, особенно в качестве токопроводящих шин.

Наиболее широкое применение получили прессованные изделия в строительстве уличных эстакад, пешеходных мостов, связывающих здания, галерей, перекрытий павильонов, подъемных кранов.

Широко применяют профили при изготовлении панельно-каркасных балочных ферм, купольных сооружений зданий, стадионов, складских помещений, теплиц, а также каркасов стен, рам, дверей, витражей, перегородок, подвесных потолков и т.п.

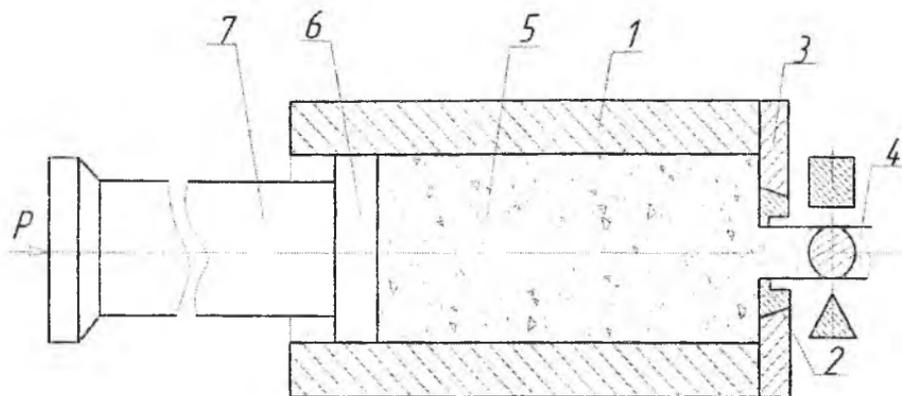
В настоящее время трудно представить развитие энергетического машиностроения без использования алюминиевых профилей и панелей. Ведущие фирмы мира используют подобные полуфабрикаты при изготовлении электродвигателей. Фасонные трубы используются в теплообменниках, в конструкции которых огромную роль играют охлаждающие элементы в виде продольных и спиральных ребер с наружной и внутренней сторон труб. Изготовление полых изделий в виде многоканальных профилей и труб не лимитируется числом каналов для протекания охлаждающих сред и реагентов.

# 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРЕССОВАНИИ

## 1.1 Сущность процесса

Представление о процессе прессования можно получить из рассмотрения схемы, приведенной на рис.1. Прессованием (выдавливанием, экструдированием) называется процесс истечения металла из замкнутого объема, заключенного в контейнере 1 между прессшайбой 6 и матрицей 2, через отверстие в матрице под действием сжимающих сил  $P$ . Форма отверстия в канале матрицы определяет форму поперечного сечения пресс-изделия 4. Заготовкой 5 является, как правило, цилиндрический слиток с диаметром чуть меньше внутреннего диаметра контейнера. Заготовку, обычно нагретую до температуры, при которой ведется прессование, помещают в контейнер 1 гидравлического пресса, представляющей собой втулку с цилиндрической полостью. В процессе прессования контейнер подогревают, чтобы уменьшить охлаждение заготовки.

Как видно из рис. 1, замкнутая полость в контейнере 1 образуется следующим образом. С одной стороны полость в контейнере замыкается матрицей 2, установленной в матрицедержателе 3. Отверстие в матрице, соответствующее сечению прессуемого профиля называют каналом или очком. С другой стороны полость контейнера закрывают пресс-шайбой 6, предохраняющий пресс-штемпель 7 от воздействия высоких температур и давлений. Диаметр пресс-шайбы несколько больше, чем у пресс-штемпеля.



1 – контейнер, 2 – матрица, 3 – матрицедержатель, 4 – профиль,  
5 – заготовка, 6 – пресс-шайба, 7 – пресс-штемпель

Рис 1. Схема прессования профилей

Усилие прессования  $P$  передается от пресса заготовке через пресс-штемпель и пресс-шайбу. Металл заготовки под давлением пресса заполняет полость контейнера и затем, не имея другого выхода, кроме отверстия в матрице, выдавливается из последнего в виде длинномерного пресс-изделия, называемого профилем 4.

Большую часть профилей прессуют через матрицы с одним каналом. В ряде случаев выгодно проводить прессование через матрицу с двумя и большим числом каналов. Такое прессование называется многоканальным.

Прессование продолжается до тех пор, пока в контейнере между пресс-шайбой и матрицей остается незначительный объем металла, называемый пресс-остатком. Пресс-остаток прежде всего исключает соприкосновение матрицы с пресс-шайбой. По окончании прессования изделие отрезают от пресс-остатка, а пресс-остаток удаляют из контейнера в отходы. После этого в контейнер загружается новая заготовка и цикл прессования повторяется.

Таким образом, прессование является периодическим, циклически

повторяющимся процессом.

Прессованием чаще всего получают следующие типовые виды профилей, отличающиеся друг от друга формой и размерами поперечного и продольного сечений, рис. 2.

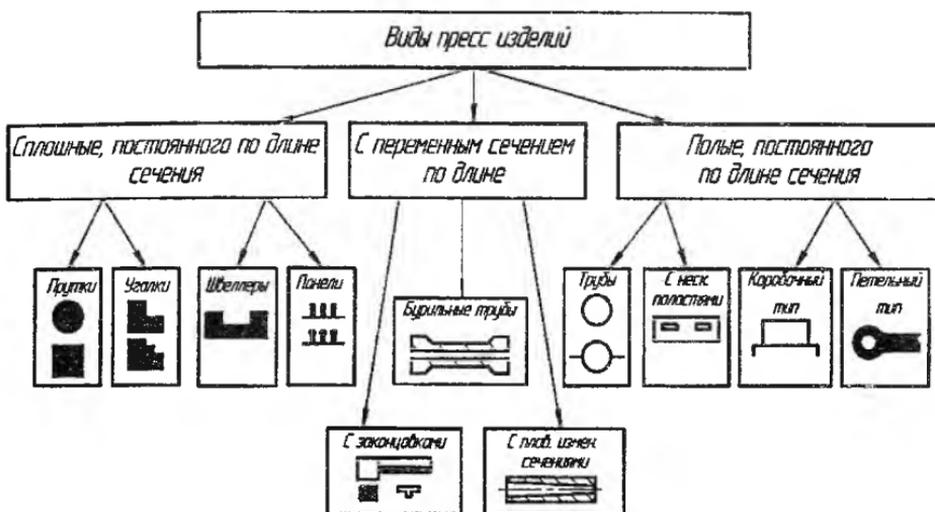


Рис. 2. Виды прессованных профилей

Перед другими видами обработки металлов давлением процесс прессования имеет следующие преимущества:

- обеспечивает наибольшую пластичность деформируемого металла, поэтому прессованием можно формоизменять малопластичные металлы, например чугун;
- позволяет за один переход получить профили сложной формы поперечного сечения;
- обеспечивает высокую точность размеров профиля, так как упругие деформации инструмента ничтожно малы;
- легко осуществляется переход с одного профиля на другой путем замены матрицы;

- позволяет деформировать заготовки с высокой степенью деформации за проход.

К недостаткам процесса прессования относят: большой расход металла из-за пресс-остатка, неоднородность механических свойств по длине и в поперечном сечении, более низкая производительность по сравнению с прокаткой.

## 1.2 Показатели деформации

Основными показателями деформации при прессовании являются:

1. Коэффициент вытяжки, или просто вытяжки  $\lambda$ . Его определяют как отношение площади поперечного сечения контейнера к площади поперечного сечения профиля (рис. 3)

$$\lambda = \frac{F_k}{f_{np}},$$

где  $F_k$  - площадь поперечного сечения контейнера;

$$F_k = \frac{\pi}{4} D_k^2;$$

$D_k$  - диаметр контейнера;

$f_{np}$  - площадь поперечного сечения профиля.

2. Интегральный показатель деформации

$$i = \ln \lambda$$

3. Степень деформации при прессовании

$$\varepsilon = \frac{F_k - f_{np}}{F_k} \cdot 100\%$$

4. Средняя скорость деформации

$$\dot{\varepsilon} = \frac{i}{\tau},$$

где  $\tau$  - время нахождения металла в очаге пластической деформации 7, локализованного около матрицы

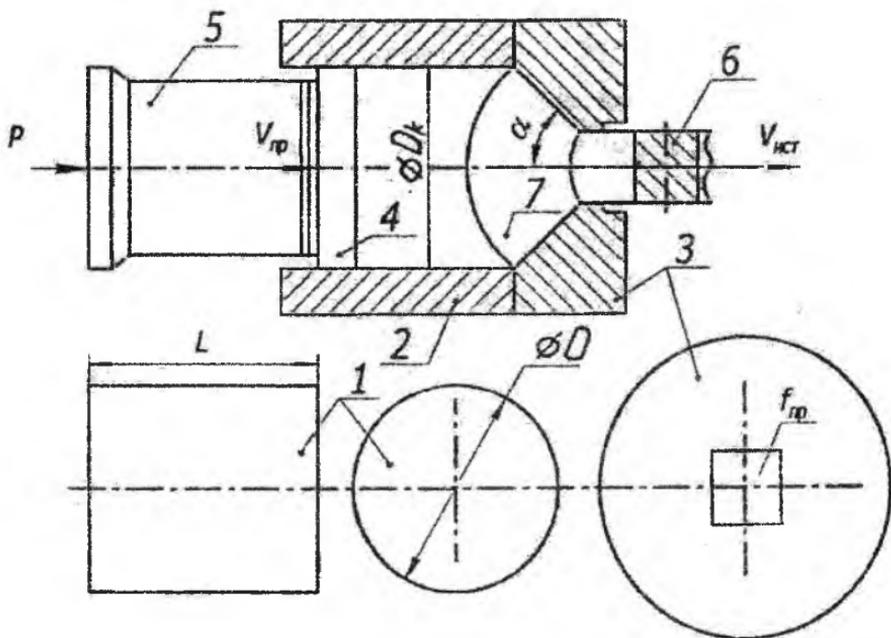
$$\tau = \frac{W}{W_{сек}}$$

$W$  - объем очага пластической деформации при прессовании круглого профиля

$$W = \frac{\pi}{12} \frac{1 - \cos \alpha}{\sin^3 \alpha} (D_k^3 - d_H^3),$$

где  $\alpha$  - угол конуса матрицы,

$d_H$  - наружный диаметр круглого профиля.



1 – заготовка, 2 – контейнер, 3 – матрица, 4 – пресс-шайба,  
5 – пресс-штемпель, 6 – профиль, 7 – очаг пластической деформации

Рис. 3. К расчету показателей деформации при прессовании

При прессовании профилей некруглой формы поперечного сечения  $d_H$  рассчитывают как приведенный диаметр из равенства площадей

$$d_H = \sqrt{\frac{4f_{np}}{\pi}}$$

Секундный объем металла, вытекающий из отверстия в матрице

$$W_{сек} = f_{np} V_{ист}$$

Различают две скорости: скорость прессования  $V_{np}$ , т.е. скорость, с которой движется пресс-штемпель 5, и скорость истечения  $V_{ист}$ , с которой металл вытекает из отверстия в матрице 3. Между этими скоростями существует зависимость

$$V_{ист} = V_{np} \lambda$$

### 1.3 Методы прессования

Рассмотрим классификацию основных методов прессования металлов с учетом конструкции оборудования, инструмента и построения технологического процесса, рис. 4.

Прессование с прямым истечением наиболее распространено в мировой практике. При прессовании прутков, профилей и труб вытекающее изделие, пресс-штемпель и пресс-шайба движутся в одном направлении. В этом методе прессования (рис. 5.) заготовка перемещается в неподвижном контейнере пресса, поэтому на контактной поверхности контейнера появляются силы трения  $T$ , затрудняющие перемещения заготовки. Прессование называется с прямым истечением, потому что направление усилия прессования совпадает с направлением течения металла.

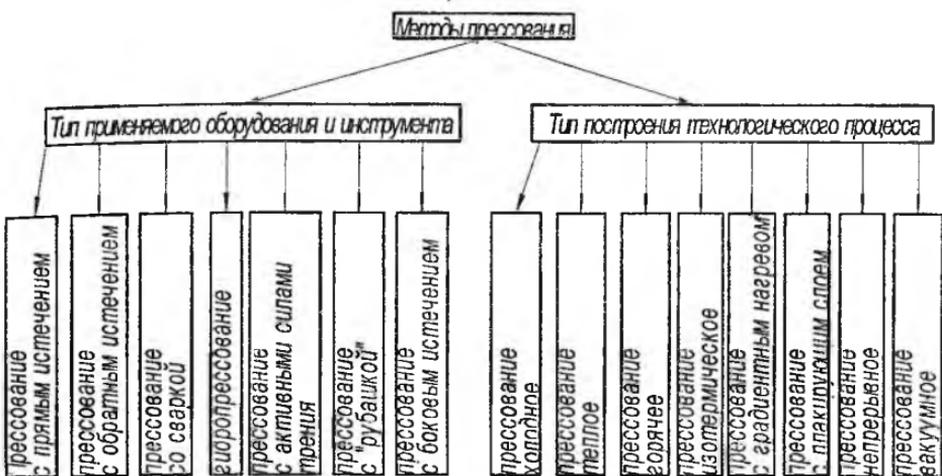
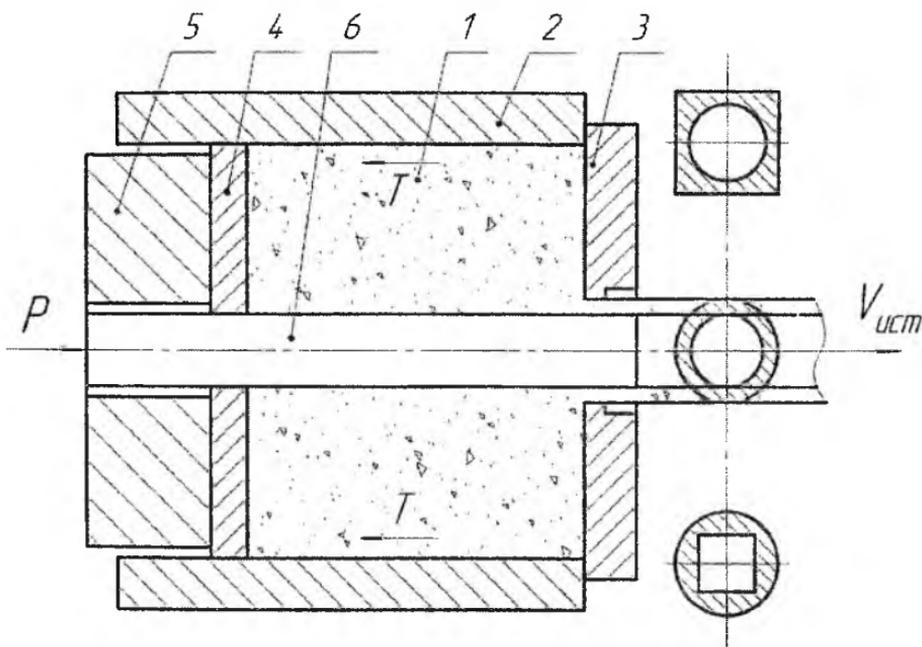


Рис 4. Классификация методов прессования



1 – заготовка, 2 – контейнер, 3 – матрица, 4 – пресс-шайба,  
5 – пресс-штемпель, 6 – игла

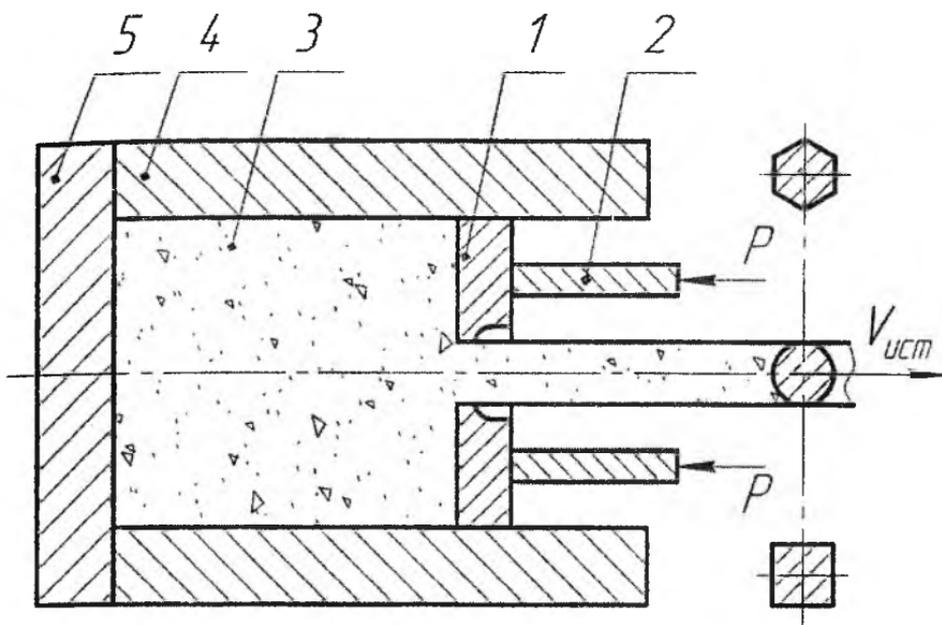
Рис. 5. Схема прессования трубы

При прессовании с прямым истечением труб и полых изделий внутри пресс-штемпеля 5 и пресс-шайбы 4 располагают иглу 6, передний торец которой проходит с некоторым зазором через отверстие в матрице 3, рис. 5. Через этот кольцевой зазор и выдавливается металл заготовки в виде длинномерной трубы. Меняя конфигурацию канала матрицы и поперечного сечения иглы можно получать трубы различных поперечных сечений.

Прессование с обратным истечением было предложено в 1924 г. англичанином Джендорсоном. Оно устраняет трение металла о стенки контейнера и снижает в связи с этим требуемую мощность оборудования на 25-40%. При этом металл заготовки движется к матрице, а наоборот матрица 1, прикрепленная к концу полого пресс-штемпеля 2, надвигается на заготовку 3, рис. 6. В этом случае нагретый металл, вытекающий через отверстие в матрице, не скользит по стенкам контейнера 4 (трение происходит только у поверхности матрицы и в канале). Для создания замкнутого объема контейнер запирается упорной шайбой (заглушкой) 5.

Разновидностью этого способа является процесс, когда контейнер вместе с заготовкой движется на неподвижный полый пресс-штемпель.

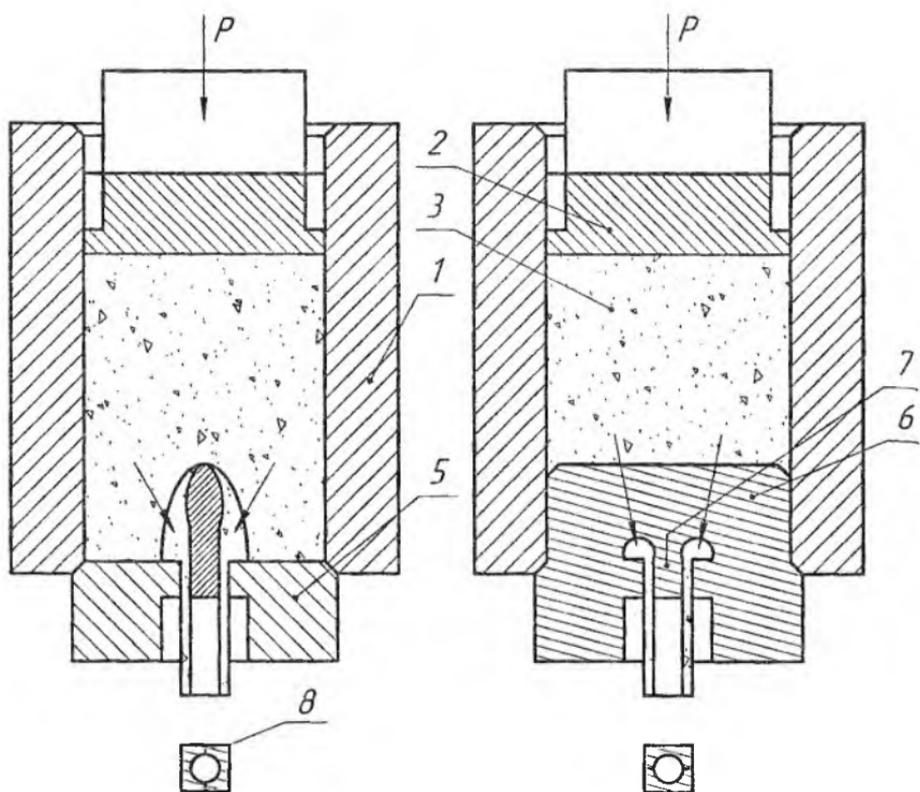
В этом способе направление течения металла противоположно направлению приложения силы прессования и поэтому такое прессование называется прессованием с обратным истечением (рис. 6.).



1 – матрица, 2 – пресс-штемпель, 3 – заготовка,  
4 – контейнер, 5 – упорная шайба

Рис. 6. Схема прессования с обратным истечением

Прессование со сваркой предложено в России ещё в 1898 г. Однако промышленное применение этот способ получил распространение после II мировой войны для прессования полых профилей сложной конфигурации из алюминиевых сплавов. Особенность способа состоит в том, что короткая игла (“язычок”) 7 крепится к корпусу самой матрицы 5, рис. 7.



1 – контейнер, 2 – пресс-шайба, 3 – заготовка, 5 – корпус матрицы,  
6 – гребень, 7 – короткая игла, 8 – полое пресс-изделие

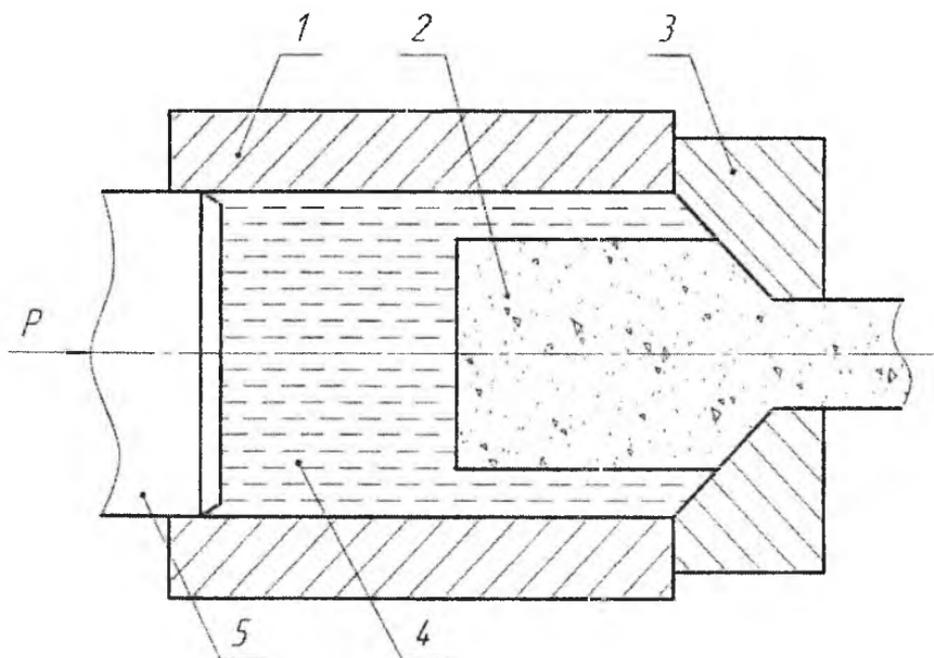
Рис. 7. Схема прессования со сваркой через язычковую матрицу.

Нагретый металл цилиндрической заготовки 3 при движении в контейнере 1 под действием пресс-шайбы 2 рассекается гребнем матрицы 6 на два потока. Эти потоки горячего металла, обтекают гребень 6 и иглу 7 встречаются друг с другом и свариваются под большим давлением. Затем металл окончательно формируется в зазоре между матрицей 5 и иглой 7 и выходит в виде полого профиля 8 с двумя сварными швами.

Матрица при прессовании профилей рассматриваемым способом объединяет собой непосредственно матрицу, формирующую наружный

контур и оправку, которая образует полость пресс-изделия. Поэтому такая матрица часто называется "матрицей с монтированной оправкой", или "язычковой". Конструкция язычковой матрицы позволяет получать полые профили самых различных форм не только с одной, но и несколькими полостями, а также профили коробчатого и петельного типов.

Гидропрессование металлов - один из быстро развивающихся методов. В полость контейнера 1 помещают заготовку 2 и подают жидкость 4, например минеральное или касторовое масло, рис. 8. При достижении в замкнутом объеме контейнера высокого гидростатического давления жидкости с помощью пресс-штемпеля 5 металл выдавливается в канал матрицы.



1 - контейнер, 2 - заготовка, 3 - матрица,  
4 - жидкая среда, 5 - пресс-штемпель

Рис. 8. Схема гидропрессования

Заготовка изолирована от инструмента слоем жидкости, поэтому трение между ними минимальное. Для уплотнения между заготовкой и матрицей, передний торец заготовки обтачивают по форме конуса матрицы. Этим методом под действием высокого давления хорошо обрабатываются самые неподатливые металлы, например чугун.

По сравнению с обычными способами прессования при гидропрессовании уменьшается необходимое усилие; увеличивается равномерность деформации как по поперечному сечению, так и по длине изделия; улучшается качество профиля; достигается возможность деформации в холодном состоянии малопластичных металлов за один проход с большими (до 90%) степенями деформации; повышаются прочностные свойства изделий с сохранением пластичности, достаточной для последующей деформации обычными методами.

Прессование с активными силами трения разработано в России проф. Я.М. Охрименко. В этом способе контейнер имеет большую скорость, чем заготовка, рис 9.

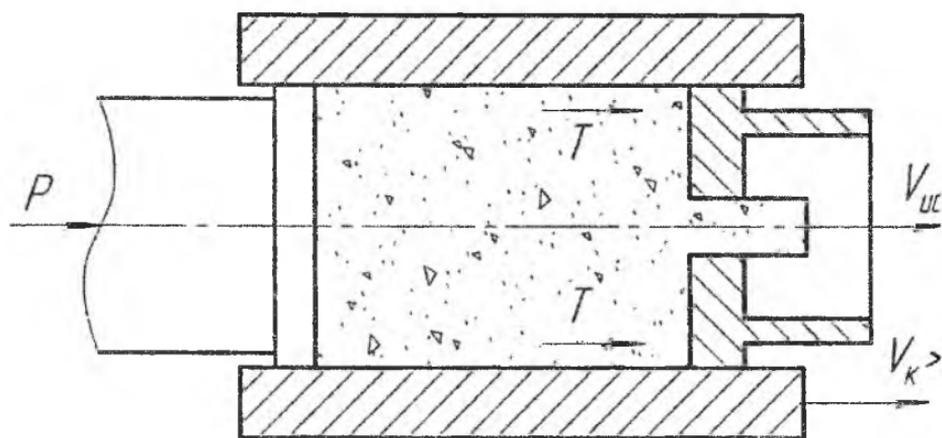


Рис. 9. Схемы прессования с активными силами трения

На поверхности заготовки создаются силы трения  $T$ , совпадающие по направлению с силой  $P$ . В результате контейнер будет увлекать за собой поверхностные слои заготовки. Такие силы трения называют активными, осуществляющими силовое воздействие. Таким образом, трение способствует выравниванию деформации по объему заготовки, повышается качество получаемых профилей.

При прессовании с «рубашкой» пресс-шайба имеет диаметр несколько меньший, чем диаметр контейнера, рис. 10.

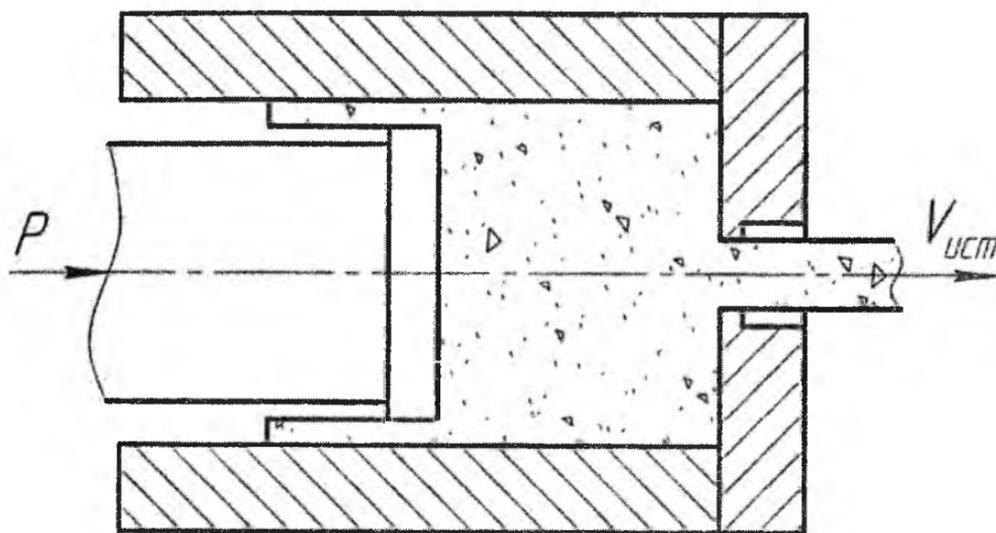
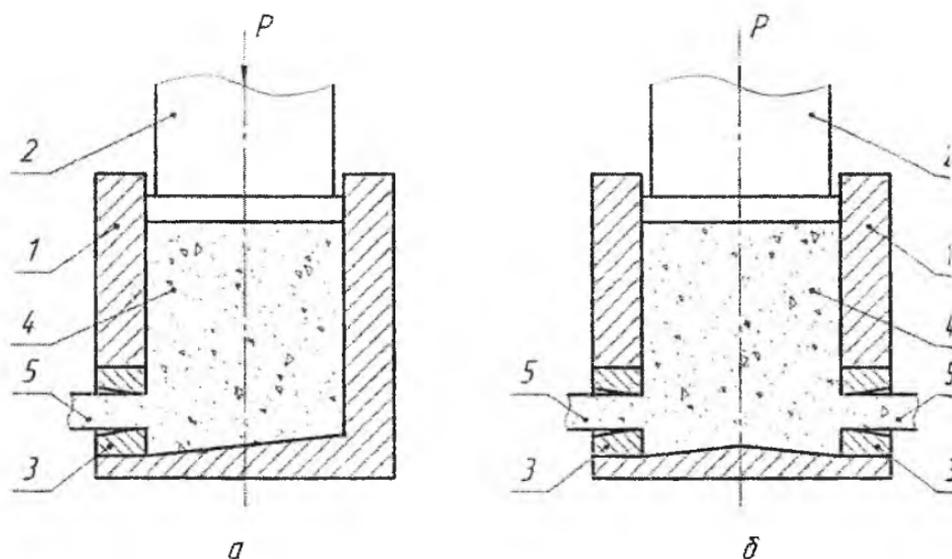


Рис.10. Схема прессования с «рубашкой»

При прямом методе прессования поверхностные слои металла срезаются пресс-шайбой в виде цельного стакана и вместе с пресс-остатком остаются в контейнере. Поверхностные дефекты заготовки и окислы, образовавшиеся при нагреве, остаются в рубашке и не попадают в пресс-иделие. После прессования рубашку из контейнера удаляют. Прессование с «рубашкой» эффективно при обратном прессовании.

Недостатком метода является увеличенное количество металла, идущее в отход.

При прессовании с боковым истечением матрица расположена под прямым углом к оси пресс-штемпеля, рис. 11.



1 – контейнер, 2 – пресс-штемпель, 3 – матрица,  
4 – заготовка, 5 – профиль

Рис. 11. Схема прессования с боковым истечением:

а) с одноканальным истечением, б) с двухканальным истечением

Усилие пресса действует на заготовку в направлении ее продольной оси, а выпрессованный металл выходит из матрицы под углом  $90^{\circ}$  к направлению действия усилия. Боковое прессование может быть одноканальным и двухканальным с расположением матриц с двух сторон контейнера, а также с двусторонним прессованием.

Боковое прессование применяют при наложении алюминиевых и свинцовых оболочек на электрический кабель, а так же при прессовании на вертикальных прессах для получения максимальной длины профиля и

наноструктурировании металла.

Холодное прессование – это прессование при дорекристаллизационной температуре, не превышающей  $0,3T_{пл}$ , где  $T_{пл}$  – температура плавления металла в градусах Кельвина. Этот метод осуществляют на прессовых установках с применением высоких энергий. Холодное прессование повышает механические свойства профилей. Так пределы прочности  $\sigma_B$  и текучести  $\sigma_T$ , а также твердость увеличиваются в два-три раза, что позволяет применять для деталей машин менее дорогие металлы. Метод обеспечивает высокое качество поверхности (шероховатость 0,32—2,5 мкм) и точность (9-11 квалитеты). В этом процессе при больших скоростях используется тепло деформации, с помощью которого разогревается металл и уменьшается сопротивление деформации.

Теплое, полугорячее и горячее прессование реализуется при температурах  $T_{np}$ :

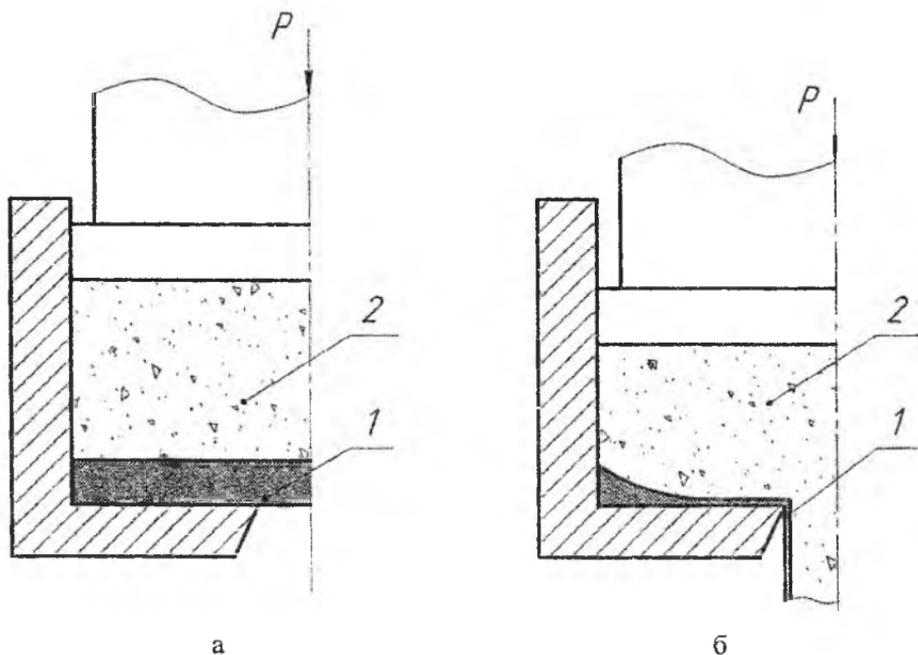
$$0,3T_{пл} \leq T_{np} < 0,5T_{пл}, \quad 0,5T_{пл} \leq T_{np} < 0,7T_{пл}, \quad T_{np} \geq 0,7T_{пл}$$

соответственно. Нагрев заготовки позволяет увеличить пластичность металла и уменьшить сопротивление деформированию. В связи с этим на практике горячее прессование наиболее распространено.

Температура заготовки в процессе прессования может возрасти от притока тепла в результате преобразования энергии деформации и энергии, идущей на преодоление сил трения на контактных поверхностях. При высокой скорости истечения при прессовании хрупких металлов это может привести к образованию поверхностных трещин на профилях. Поэтому для создания условий прессования при одинаковой температуре заготовки, процесс ведут так, чтобы повышение тепла от процесса работы деформации компенсировалось соответствующим снижением скорости истечения. Такое прессование называется изотермическим.

Иногда перед прессованием заготовку нагревают неравномерно по длине. Более нагрет торец заготовки, располагающийся около матрицы, менее нагретый торец около пресс-шайбы. В процессе прессования температура заготовки выравнивается от тепла работы деформации. Такое прессование называется прессованием с градиентным нагревом.

Прессование с плакирующим слоем. На рис. 12 приведена схема процесса плакирования профиля из сплава Д16 мягким металлом из АД0, обволакивающим передний конец пресс-изделия и распределенным тонким слоем по всему изделию.



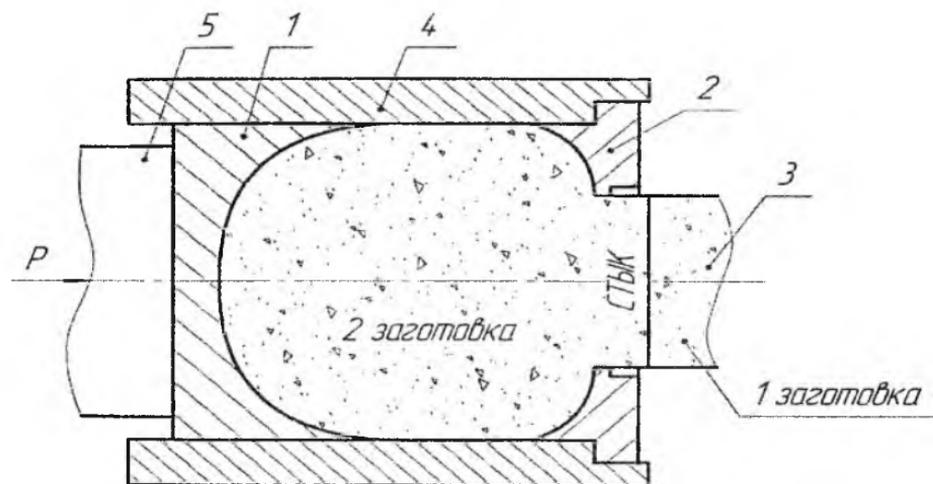
а — исходная заготовка, б — деформированная заготовка;

1 — плакирующий, 2 — основной металлы

Рис. 12. Схема прессования плакированного прутка из сплава Д16 с применением передней прокладки из сплава АД0

При разработке методов непрерывного прессования вначале были разработаны способы полунепрерывного прессования без пресс-остатка.

При прессовании компактных по форме профилей разработан метод прессования без пресс-остатка без сварки торцов слитков, рис. 13. В этом методе используют вогнутые пресс-шайбу 1 и матрицу 2. Вогнутая поверхность пресс-шайбы подбирается таким образом, чтобы торцы выпрессованных профилей были плоскими. Вогнутая поверхность матрицы должна обеспечивать равномерное истечение металла. Прессование ведут слиток за слитком со смазкой, наносимой на слиток и контейнер, благодаря чему пресс-изделия 3, свободно отделяются одно от другого.



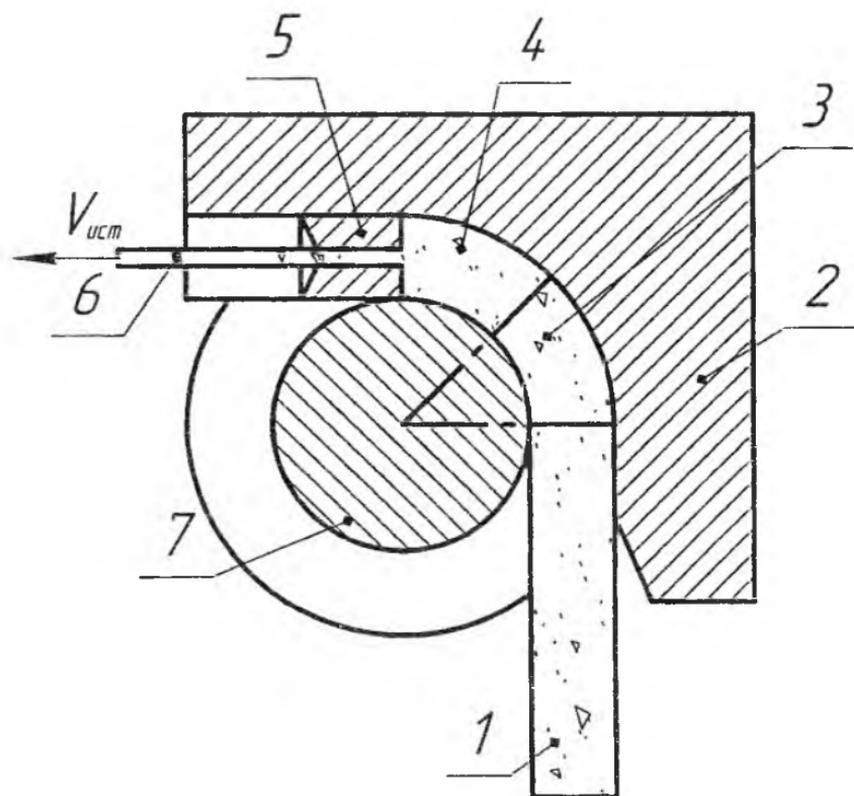
1 – пресс-шайба, 2 – матрица, 3 – профиль,  
4 – контейнер, 5 – пресс-штмпель

Рис. 13. Схема полунепрерывного прессования

При прессовании проволоки, шин очень большой длины из хорошо сваривающихся давлением металлов (алюминий, свинец) не возникает необходимости отделения пресс-остатка. Процесс останавливают после того, как заготовка отпрессована на 2/3 своей длины. Далее в контейнер

закладывают следующий слиток и процесс повторяют. При прессовании оба слитка по торцевым поверхностям свариваются между собой. В пресс-изделии зона сварки имеет параболический вид.

При непрерывном прессовании необходимы заготовки неограниченной длины. Для их прессования в 1972 г. предложен конформный процесс, рис. 14. Цилиндрический контейнер заменяют на контейнер прямоугольного сечения. Устройство содержит вращающийся диск 7 с кольцевой полостью и матрицедержателем 2. Канал матрицы 5 выполнен в



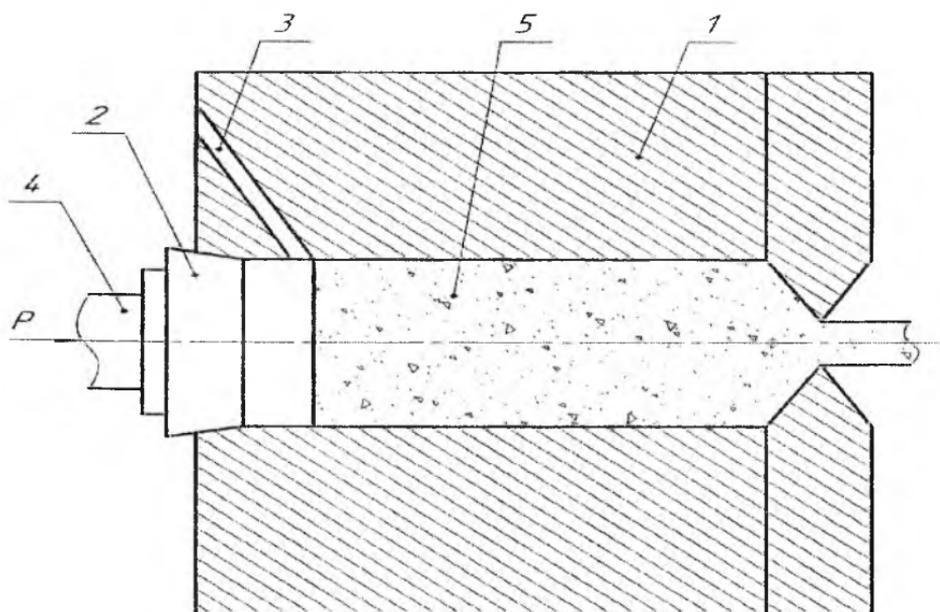
1 -

заготовка, 2 - матрицедержатель, 3 - зона первичного захвата, 4 - зона выдавливания, 5 - матрица, 6 - изделие, 7 - вращающийся диск

Рис. 14. Схема непрерывного прессования с применением вращающегося диска

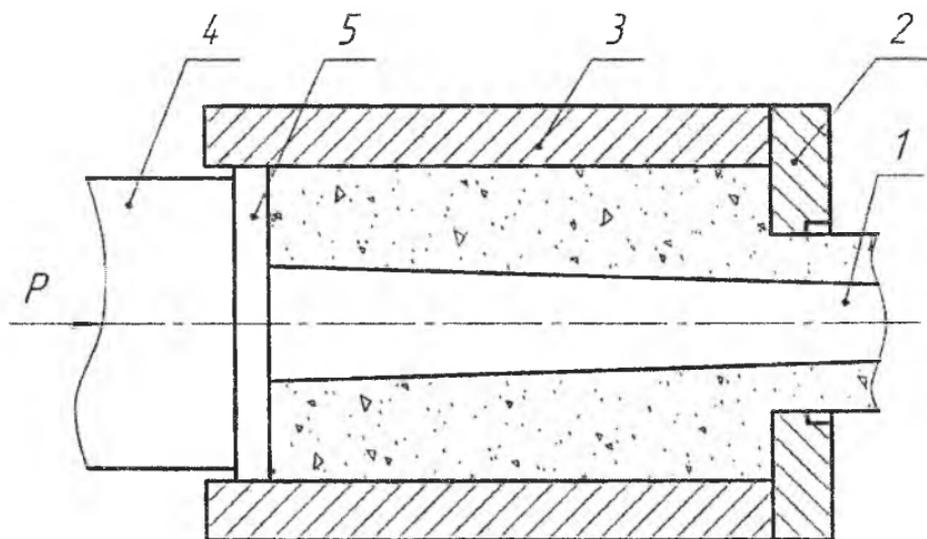
упоре матрицедержателя. Прессование происходит за счет активных сил трения  $T$ , передаваемых заготовке 1 вращающимся диском. В качестве заготовки используют катанку или прутки круглого или квадратного сечения, свернутый в бухту. В промышленных условиях способ реализован для прессования проволоки и профилей небольших размеров.

Прессование вакуумное применяют для обработки тугоплавких металлов. При нагреве на воздухе эти сплавы окисляются и насыщаются газами, что приводит к охрупчиванию поверхностного слоя. Например, ниобий начинает окисляться при  $250^{\circ}\text{C}$ , молибден при  $400^{\circ}\text{C}$ . Прессование проводят с вакуумированием контейнера через полость в пресс-штемпеле или контейнере, рис. 15.



1-контейнер, 2-пресс-шайба из мягкого материала,  
3-канал для откачки воздуха, 4-пресс-штемпель, 5-заготовка  
Рис. 15. Схема прессования с вакуумированием контейнера

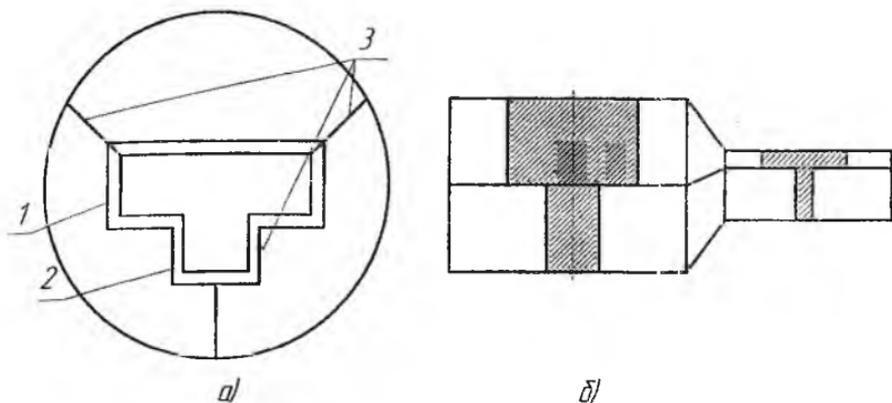
Прессование профилей переменного по длине поперечного сечения ведется двумя путями один путь – применение коническо-ступенчатых игл, а другой применение разборных матриц или матриц с подвижными частями. На рисунке приведена схема прессования труб переменного поперечного сечения (рис. 16.) с помощью конических игл.



1 – игла коническая, 2 – матрица, 3 – контейнер,  
4 – пресс-штемпель, 5 – пресс-шайба

Рис. 16. Схема прессования трубы переменного сечения

В технике много конструкций, которые имеют нагруженную консольную часть. Наиболее экономично её изготовление когда сечение у основания наибольшее, а у конца наименьшее. Такие профили называют профилями с законцовками. Их можно получить, если останавливать процесс прессования и заменять матрицу. При этом осуществляют переход от меньшего сечения к большему. Для этой цели используют разборные матрицы, рис. 17.



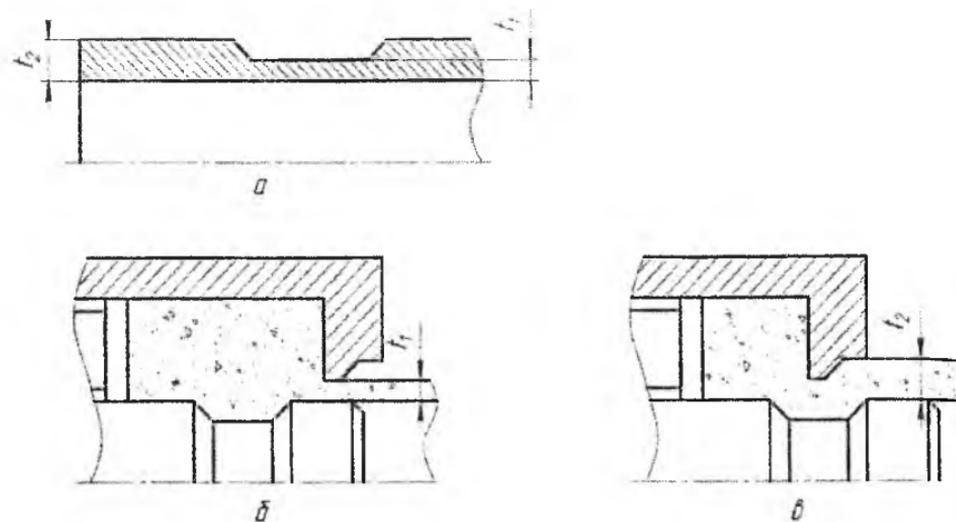
1 – канал первой матрицы, 2 – канал второй матрицы,  
3 – линия разъема матриц

Рис. 17. Конструкция разборной матрицы для прессования  
профиля с законцовкой

Для бурильных установок, применяющихся в геологической разведке используют трубы периодического сечения с внешними утолщениями с обоих концов трубы для нарезания резьбы. Схема изготовления таких труб приведена на рис. 18. Рабочие части иглы для прессования таких труб имеют различные диаметры по длине. Устанавливая первоначально в матрице иглу малого диаметра (рис. 18в), получают утолщение на конце трубы  $t_2$  следующим образом. Так как передняя часть иглы имеет большой диаметр, то выходящая труба при прохождении через нее раздается и внутренний диаметр её становится соответствующим большому диаметру иглы. Устанавливая в матрице иглу большого диаметра (рис. 18б) при прессовании формообразуется стенка самой трубы  $t_1$ .

Выбор метода прессования зависит от вида прессуемого профиля. Например, труба может быть изготовлена горячим прессованием со сваркой через язычковые матрицы или горячим прессованием с иглой

через обычные матрицы. При прессовании с иглой нужны полые заготовки, иглу может увести. При прессовании со сваркой нужны сплошные заготовки. Так как игла короткая, то её не уведит, но на профиле имеют место сварные швы. Сопоставляя преимущества и недостатки каждого из методов прессования можно выбрать оптимальный.



а – поперечное сечение бурильной трубы, б – формообразование утолщения, в – формообразование стенки трубы.

Рис. 18. Схема прессования трубы с наружными утолщениями

#### 1.4 Вопросы для самоконтроля

1. В чем сущность процесса прессования?
2. Перечислите инструмент для прессования металлов.
3. Перечислите типовые виды профилей, получаемые прессованием.
4. Каковы достоинства и недостатки процесса прессования?
5. Как рассчитать коэффициент вытяжки при прессовании?
6. Чем отличается скорость прессования от скорости истечения?

7. Назовите основные методы прессования прутков и профилей, панелей и пустотелых изделий?
8. В чем сущность прессования с прямым истечением металла?
9. В каких методах устраняется трение заготовки о стенки контейнера?
10. Как получают прессованием пустотелые изделия?
11. Какие особенности гидропрессования металлов?
12. В каком методе прессования силы трения становятся активными?
13. Как получить плакированные профили?
14. Как изготовить прессованием профиль с законцовкой?
15. Что такое прессование?
16. Когда возникает необходимость прессования с рубашкой?
17. Чем отличается горячее прессование от теплого или холодного?
18. Какой эффект дает прессование с градиентным нагревом?
19. Как отпрессовать трубы с наружными утолщениями?
20. Назовите способы прессования изделий переменного сечения по длине?
21. Каким образом осуществляют прессование в вакууме?

### 1.5 Задачи

1. Записать формулы для вычисления коэффициента вытяжки при прессовании трубы: а) из сплошной заготовки; б) из поллой заготовки.
2. Записать формулу для коэффициента вытяжки при прессовании через многоканальные матрицы.
3. Толщина линий координатной сетки равна 1мм. Определить минимально возможную толщину координатных линий после прессования. В расчётах принять: диаметр контейнера 50 мм, диаметр прутка 20 мм.

4. Вывести формулу для вычисления коэффициента вытяжки при прессовании труб с переменной толщиной на конической игле. Построить график изменения  $\lambda$  в зависимости от текущего радиуса иглы. Нарисовать возможные схемы изготовления таких труб методами прессования.

5. Определить диаметр контейнера для прессования квадратного прутка со стороной 35 мм с коэффициентом вытяжки  $\lambda = 25$ .

6. Найти связь между степенью деформации  $\varepsilon$  и коэффициентом вытяжки  $\lambda$  при прессовании; для  $\varepsilon = 92\%$ , найти  $\lambda$

7. Определить среднюю скорость деформации при прессовании прутка диаметром 10 мм из контейнера диаметром 50 мм со скоростью истечения 5 м/мин. Принять  $\alpha = 60^\circ$ .

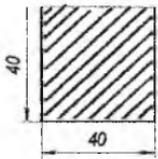
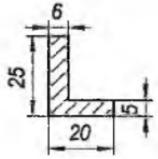
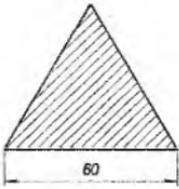
8. При прессовании заготовки на длину 150 мм был получен профиль длиной 2250 мм. Определить коэффициент вытяжки. Указание. Использовать условие постоянства объёма.

9. Определить значения средней скорости деформации по данным таблицы 3.

10. Рассчитать скорость истечения при прессовании профиля поперечным сечением в виде равностороннего треугольника со стороной 30 мм из контейнера диаметром 100 мм при  $V_{пр} = 0,5$  м/мин.

11. Предложить схемы прессования профилей, показанных на рис. 19.

Табл. 3. Данные для расчета

| № варианта | Размеры сечения пресс-изделия   | $D_k, \text{мм}$ | $V_{пр}, \frac{\text{м}}{\text{мин}}$ | $\alpha^0$ |
|------------|---|------------------|---------------------------------------|------------|
| 1          |  | 100              | 2                                     | 30         |
| 2          |  | 115              | 5                                     | 60         |
| 3          |  | 130              | 1                                     | 60         |

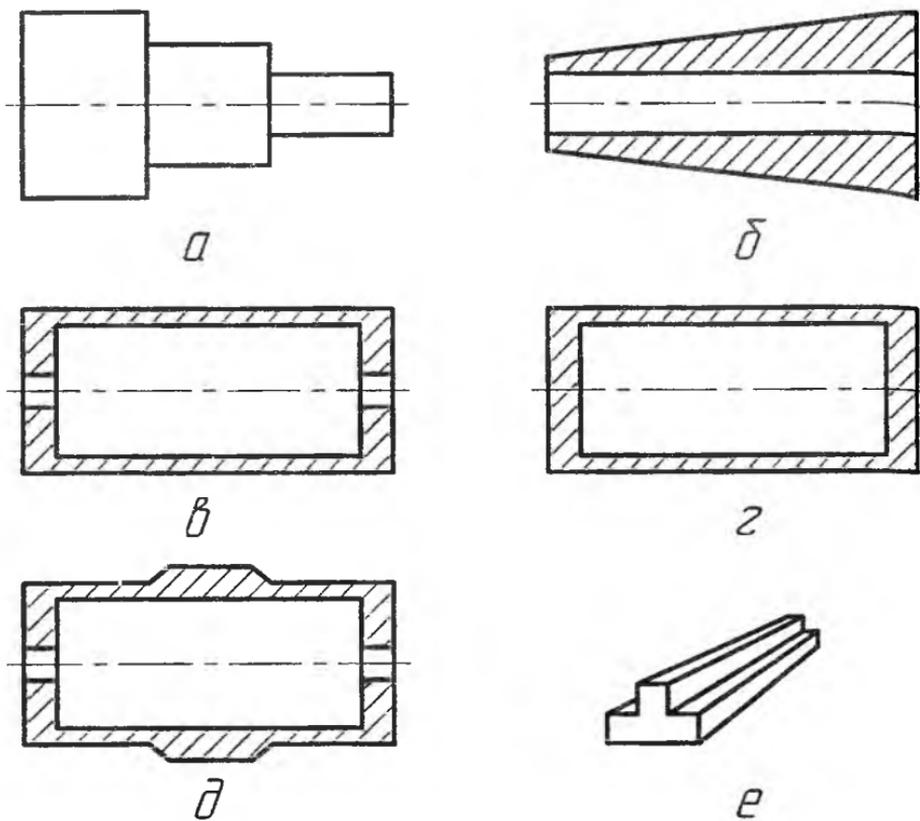


Рис. 19. Профили

## 2 ТЕОРИЯ ПРЕССОВАНИЯ

### 2.1 Стадии прессования

Наиболее распространенный процесс прямого прессования через плоскую матрицу можно условно разделить по усилию на три стадии: начальную, основную и заключительную, рис. 20.

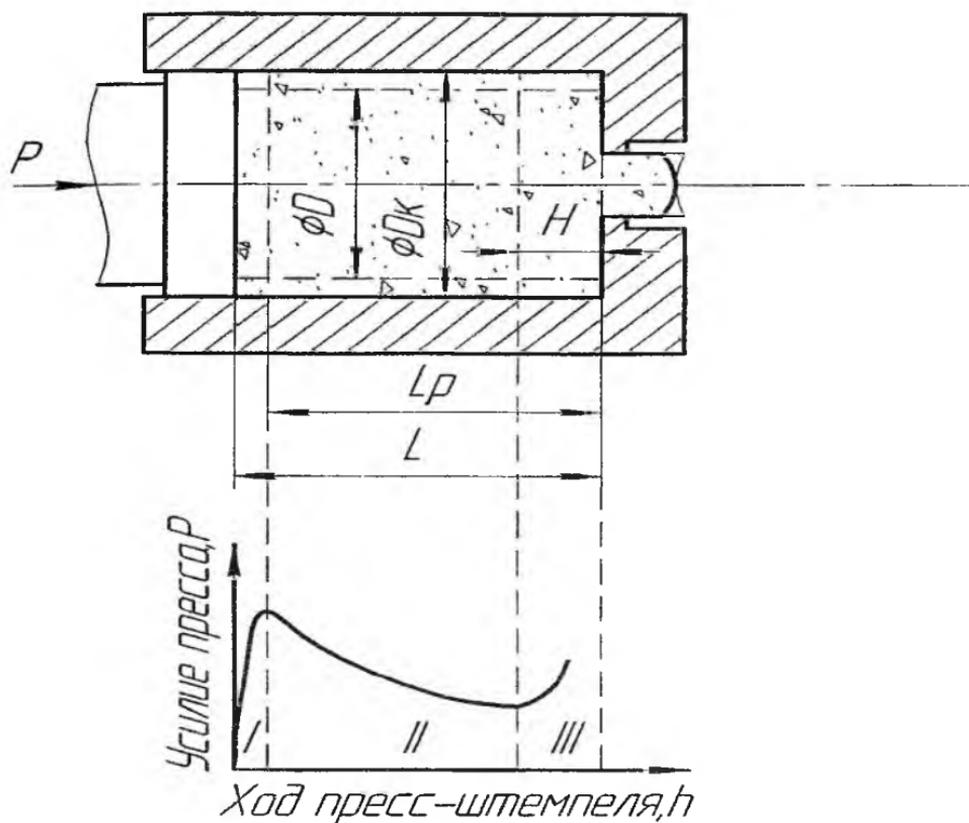
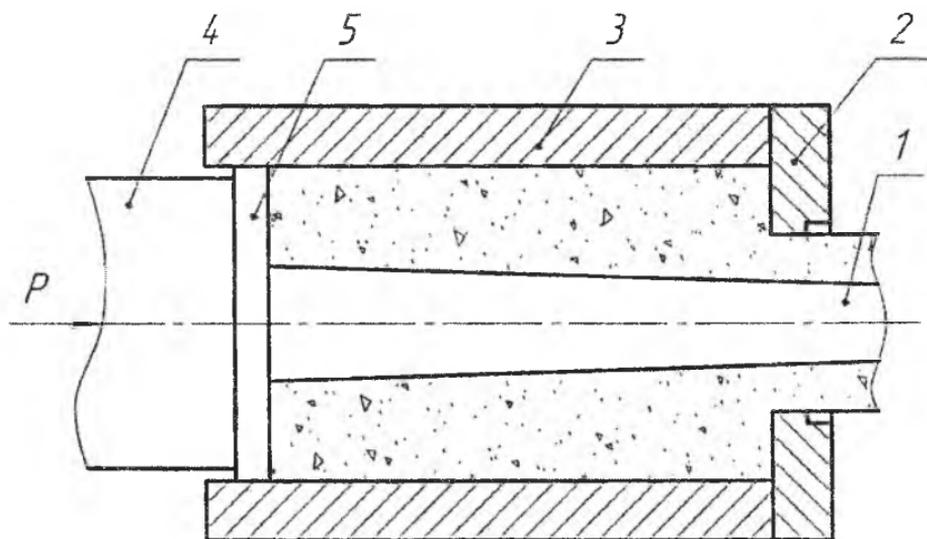


Рис. 20. Стадии прямого прессования

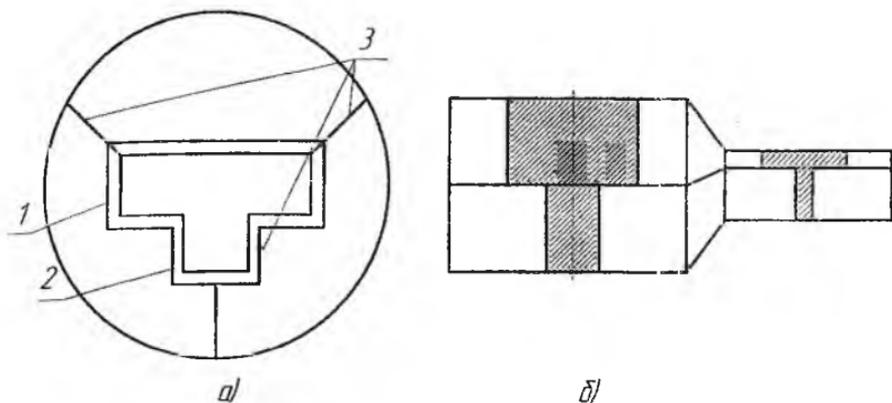
Прессование профилей переменного по длине поперечного сечения ведется двумя путями один путь – применение коническо-ступенчатых игл, а другой применение разборных матриц или матриц с подвижными частями. На рисунке приведена схема прессования труб переменного поперечного сечения (рис. 16.) с помощью конических игл.



1 – игла коническая, 2 – матрица, 3 – контейнер,  
4 – пресс-штампель, 5 – пресс-шайба

Рис. 16. Схема прессования трубы переменного сечения

В технике много конструкций, которые имеют нагруженную консольную часть. Наиболее экономично её изготовление когда сечение у основания наибольшее, а у конца наименьшее. Такие профили называют профилями с законцовками. Их можно получить, если останавливать процесс прессования и заменять матрицу. При этом осуществляют переход от меньшего сечения к большему. Для этой цели используют разборные матрицы, рис. 17.



- 1 – канал первой матрицы, 2 – канал второй матрицы,  
3 – линия разъема матриц

Рис. 17. Конструкция разборной матрицы для прессования  
профиля с законцовкой

Для бурильных установок, применяющихся в геологической разведке используют трубы периодического сечения с внешними утолщениями с обоих концов трубы для нарезания резьбы. Схема изготовления таких труб приведена на рис. 18. Рабочие части иглы для прессования таких труб имеют различные диаметры по длине. Устанавливая первоначально в матрице иглу малого диаметра (рис. 18в), получают утолщение на конце трубы  $t_2$  следующим образом. Так как передняя часть иглы имеет большой диаметр, то выходящая труба при прохождении через нее раздается и внутренний диаметр её становится соответствующим большому диаметру иглы. Устанавливая в матрице иглу большого диаметра (рис. 18б) при прессовании формообразуется стенка самой трубы  $t_1$ .

Выбор метода прессования зависит от вида прессуемого профиля. Например, труба может быть изготовлена горячим прессованием со сваркой через язычковые матрицы или горячим прессованием с иглой

Основная стадия начинается с выдавливания профиля через канал матрицы. Она проходит при относительно установившемся течении металла. По мере выдавливания заготовки из контейнера и уменьшения величины поверхности контакта заготовки с контейнером усилие прессования снижается, так как снижается величина той доли усилия прессы, которая идёт на преодоление сил трения  $T$  по контейнеру.

Эта стадия характеризуется наличием различных устойчивых объёмов внутри заготовки, в которых происходит упругие и пластические деформации, рис. 22.

Наибольшие деформации развиваются в заготовке в непосредственной близости от зеркала матрицы. Это очаг пластической деформации (ОПД). Основная часть заготовки в это время деформируется мало и может рассматриваться как упругое тело.

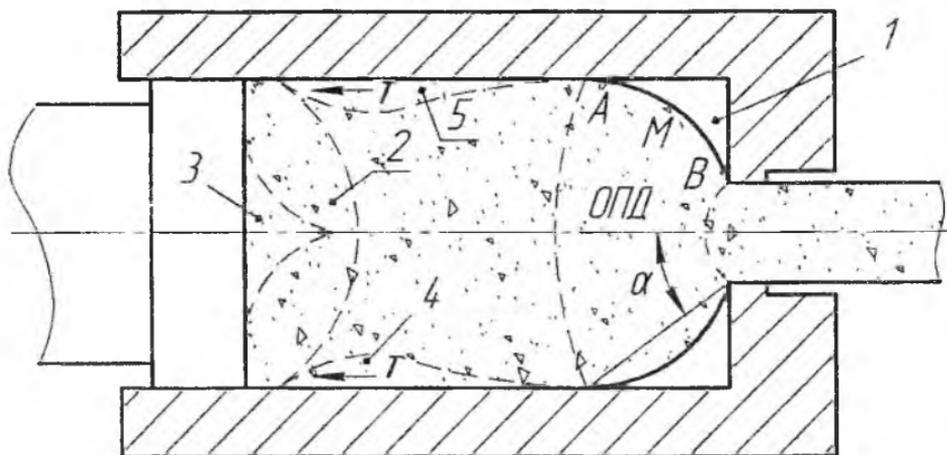


Рис. 22. Схема образования различных устойчивых объёмов внутри заготовки

В металле заготовки проявляются различные упругие зоны вызванные взаимодействием деформируемого металла и инструмента. В

иногда называют «мёртвой». Упругая зона у матрицы образует как бы неподвижную матричную воронку. Металл из этой зоны в пресс-изделие не выдавливается. Образующая зоны 1 имеет поверхность брахистохроны (линии ----- АМВ) В практических расчётах образующую АМВ заменяют конусом с углом  $\alpha$  и называют углом естественного течения металла. В зависимости от условий прессования величина  $\alpha$  может меняться. Для прессования алюминиевых сплавов  $\alpha = 60^\circ$ .

Упругую зону 1 у матрицы невозможно выпрессовать. Она идёт в отход в виде пресс-остатка. Поэтому целесообразно её уменьшать. Если рабочую поверхность матрицы выполнить с поверхностью АМВ, то упругая зона не образуется.

Существование упругих зон у пресс-шайбы (2, 3) объясняется удалённостью объёмов и их заоложенностью (2) и симметричностью течения (3). Зона (3) проявляется в последний момент при приближении пресс-шайбы к матрице.

Течение металла у пресс-шайбы вызывает появление заторможенных объёмов 4. Эти объёмы создаются также и потому, что заоложенный тонкий слой металла (5) соскабливается в процессе прессования в более компактный объём. Образование зон 4 приводит к собиранию загрязнений с поверхности заготовки в объём у пресс-шайбы. Это позволяет при прямом прессовании получить чистую поверхность изделий, если оставлять «мёртвые» зоны в виде пресс-остатка.

На заключительной стадии пресс-шайба приближается к матрице, рис. 23. Упругая зона 2 исчезает она начинает питать очаг пластической деформации.

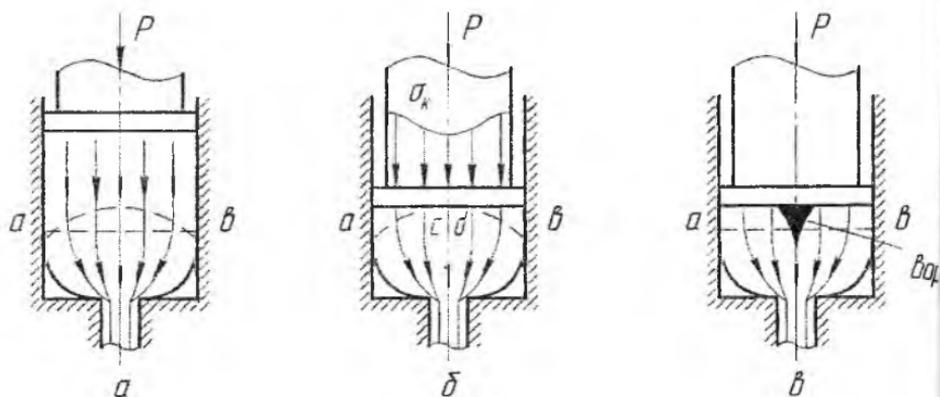


Рис. 23. Схема заключительной стадии прессования

До подхода пресс-шайбы к ОПД, питание ОПД происходит по всей границе а-в за счёт выпележащих слоёв, рис. 23а. После пересечения плоскостью пресс-шайбы верхней границы ОПД на участках ас и дв питание осуществляется по-прежнему. На участке сд питание выпележащими слоями прекращается. По закону наименьшего сопротивления металл периферийных слоёв устремляется к центру. В результате за счёт периферийных слоёв происходит восполнение недостающего объёма металла. Такое течение в какой-то промежуток времени обеспечивает целостность металла в ОПД.

С того момента, когда расход металла из центральных слоёв окажется больше поступления металла из периферийных слоёв начинается образование центральной воронки (полости), глубоко проникающей в очаг пластической деформации и пресс-изделие. Эту полость называют пресс-утжиной. На поверхности пресс-шайбы наблюдается интенсивное течение металла в радиальном направлении, что и приводит к росту усилия прессования.

Чтобы исключить образование пресс-утжины заготовку прессуют в до конца, оставляя небольшой объём металла высотой Н, называемый пресс-остатком. В пресс-остаток попадает металл, находящийся

пресс-остатком. В пресс-остаток попадает металл, находящийся в «мёртвой» зоне, а также различные загрязнения с поверхности заготовки. Форма пресс-утяжины определяется сечением прессуемого профиля. Если пресс-утяжина проникла в профиль, то эту часть профиля удаляют.

Величина пресс-утяжины зависит от многих факторов. Чем меньше угол канала матрицы, тем меньше вероятность образования пресс-утяжины. Увеличение диаметра заготовки вызывает рост пресс-утяжины, а длина заготовки на образование пресс-утяжины не влияет. Смазка контейнера и пресс-шайбы способствует уменьшению пресс-утяжины. При обратном методе пресс-утяжина образуется при меньшей высоте пресс-остатка, чем при прямом методе. Чем равномернее течение металла, тем меньше пресс-утяжина.

В настоящее время не разработана теория образования центральной пресс-утяжины, позволяющая аналитически определить высоту пресс-остатка, поэтому её размеры определяют опытным путём. Величина пресс-остатка для прямого метода равна 0,3 Дк, обратного метода - 0,1 Дк.

Пресс-остаток отделяют от пресс-изделия. С этой целью при прямом методе контейнер отводят от матрицы, рис. 24. В зазор между контейнером и матрицей вводят нож и отрезают от профиля пресс-остаток с пресс-шайбой.

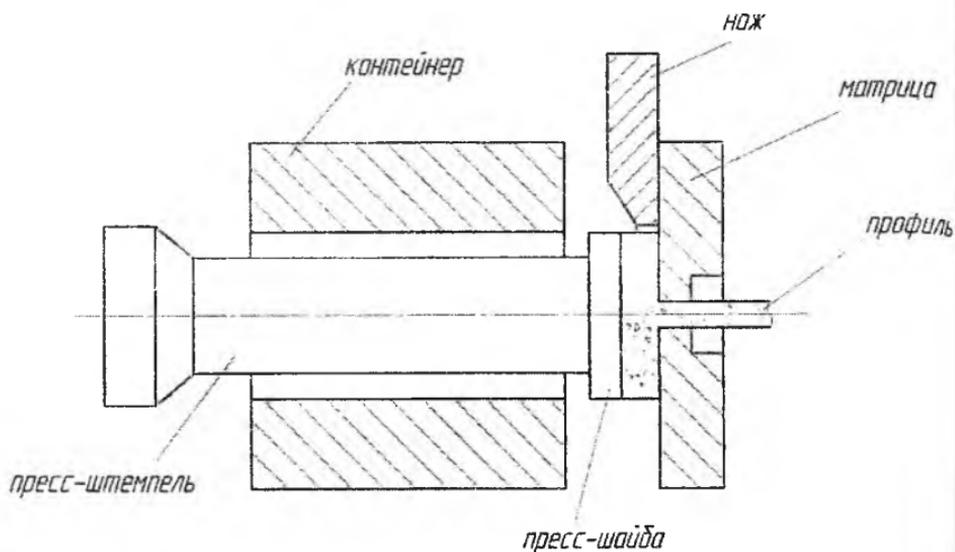


Рис. 24. Схема отделения пресс-остатка

Далее в отдельном устройстве отделяют пресс-шайбу от пресс-остатка. Профиль удаляется из канала матрицы последующей заготовкой.

## 2.2 Течение металла на основной стадии

Рассмотрим типичную картину изменений координатной сетки получаемой при прямом методе прессования круглого прутка через коническую матрицу на основной стадии процесса.

Сущность метода координатной сетки состоит в том, что в меридиональное сечение цилиндрической заготовки наносят систему геометрических рисок в виде линий, точек, кругов, путём накатки, травления, царапания.

Заготовка предварительно разрезается на два полуцилиндра. На плоскость реза одного из полуцилиндров наносят координатную сетку. Затем части заготовки составляют вместе по поверхности разъёма

предварительно покрытого, например, машинным маслом для предотвращения сварки и подвергают прессованию как цельное металлическое тело. После прессования заготовка вновь разнимается и по ней судят о характере течения металла, рис. 25.

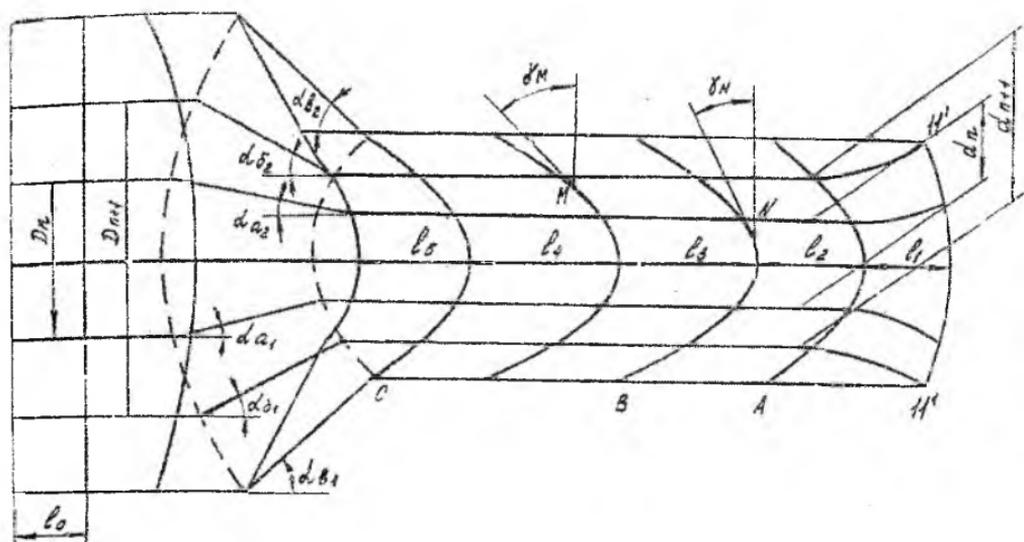


Рис. 25. Схема искажения координатной сетки при прямом прессовании через коническую матрицу

По искажениям координатной сетки видно, что

1. Все прямые продольные линии до прессования остаются прямыми после прессования за исключением переднего конца прутка.
2. Все продольные линии претерпевают изгибы у входа в ОПД и у выхода из него. Изгибы линий определяют торцевые границы ОПД. Изгибы направлены во взаимно-противоположные стороны, что свидетельствует о немонотонности деформации. Немонотонность деформации уменьшается от периферии к центру.

3. Все поперечные линии начальной координатной сетки симметрично изгибается выпуклостью в направлении движения прессуемого металла. Это указывает на большое отставание периферийных слоёв от центральных. Отставание объясняется действием силы трения формой канала матрицы и т.д.

4. На переднем конце прутка имеют место незначительные деформации. Причина – передний конец расположен напротив отверстия в матрице и не претерпевает тех изменений, которым подвергается основная масса заготовки. Поэтому передний конец прутка удаляют в отход.

5. Все осевые квадраты превращаются в фигуры близкие к прямоугольникам, а все периферийные квадраты – к сильно вытянутым параллелограммам, что указывает на нарастание сдвиговых деформаций от центра к периферии.

6. Изменение ранее прямых продольных и поперечных линий указывает на большую неравномерность деформаций не только по длине прутка, но и по сечению.

Для количественной оценки деформированного состояния используют следующие упрощённые показатели:

1. Коэффициент вытяжки центральных слоёв определяют по отношению длин сторон ячеек, параллельных оси до -  $\epsilon_0$  и после прессования -  $\epsilon_1$ .

$$\lambda_{ц} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0}$$

2. Коэффициент вытяжки периферийных слоёв определяют по отношению площадей поперечных сечений цилиндрических слоёв до и после прессования.

$$\lambda_n = \frac{D_{n+1}^2 - D_n^2}{d_{n+1}^2 - d_n^2}$$

3. Сдвиговую деформацию определяют путём измерения угла, образованного касательной к поперечной и линии, перпендикулярной к оси прессования.

Если зафиксировать через промежуток времени  $\Delta t$  координаты (ij) узла координатной сетки, то можно найти средние скорости перемещения частиц металла заготовки

$$V_z = \frac{z_{ij} - z_{i1}}{\Delta t} \text{ (осевая скорость)}$$

$$V_p = \frac{r_{ij} - r_{i1}}{\Delta t} \text{ (радиальная скорость)}$$

Зная значения компонент скоростей в каждом (ij) узле, нетрудно найти скорости деформаций

$$\xi_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}; \xi_R = \frac{\partial V_R}{\partial R}; \xi_\theta = \frac{V_R}{R}; \eta_{Rz} = \frac{\partial V_z}{\partial R} + \frac{\partial V_R}{\partial z}$$

удовлетворяющих условию постоянства объёма

$$\frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial V_R}{\partial R} + \frac{V_R}{R} = 0$$

и интенсивность скоростей деформаций

$$\varepsilon_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\xi_R - \xi_\theta)^2 + (\xi_\theta - \xi_z)^2 + (\xi_z - \xi_R)^2 + \frac{3}{2} \eta_{Rz}^2}$$

На рис. 26. показано влияние метода прессования на искажение поперечных линий координатной сетки.

При обратном методе прессования отсутствуют силы трения по контейнеру, поэтому поперечные линии начинают изгибаться только вблизи матрицы. Течение металла при обратном прессовании по сравнению с прямым более равномерное. При прессовании с активными силами трения поперечные линии становятся не выпуклыми, а вогнутыми, так как они изгибаются на периферийных участках вперёд по ходу движения пресс - шайбы.

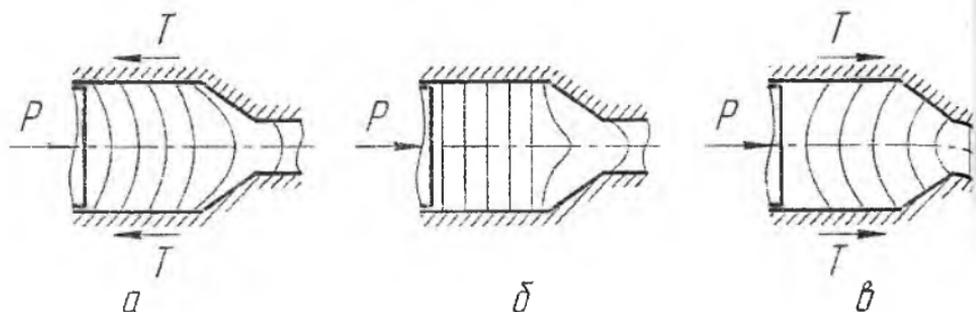


Рис. 26. Влияние метода прессования на искажение поперечных линий координатной сетки:

а - прямой, б - обратный, в - с активными силами трения  $T$

Течение прессуемого металла в большой степени зависит от величины трения между заготовкой и контейнером, рис. 27.

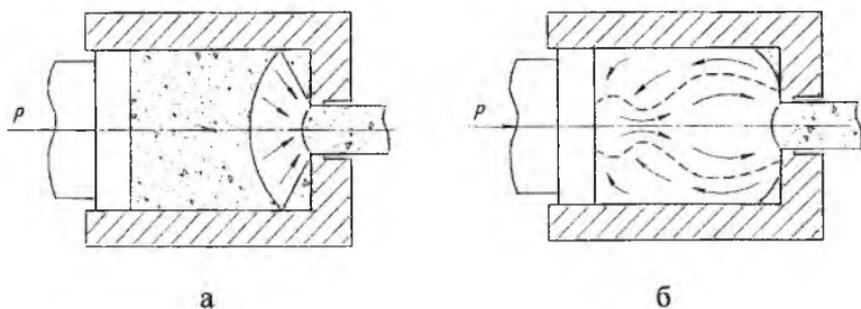


Рис. 27. Влияние величины трения на характер течения металла:

а - трение мало, б - трение велико

При малом трении большая часть металла заготовки находится в упругом состоянии. Пластическое течение локализовано около матрицы. Неравномерность течения металла связана в основном с наличием канала в матрице. Такая картина имеет место при холодном прессовании с смазкой, гидропрессовании и прессовании с обратным истечением. При большом трении внутри заготовки происходит турбулентное течение

(перемешивание слоёв). Металл периферийных слоёв течёт в обратном направлении. Затем у пресс-шайбы вливается в общее течение в центральную зону.

### 2.3 Напряженно-деформированное состояние

При прессовании напряженно-деформированное состояние в любой точке деформируемой заготовки в цилиндрической системе координат  $(R, \theta, Z)$  описывается симметричными тензорами напряжений и деформаций

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_R & \tau_{R\theta} & \tau_{RZ} \\ \tau_{\theta R} & \sigma_{\theta} & \tau_{\theta Z} \\ \tau_{ZR} & \tau_{Z\theta} & \sigma_Z \end{pmatrix}, \quad T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_R & \frac{1}{2}\gamma_{R\theta} & \frac{1}{2}\gamma_{RZ} \\ \frac{1}{2}\gamma_{\theta R} & \varepsilon_{\theta} & \frac{1}{2}\gamma_{\theta Z} \\ \frac{1}{2}\gamma_{ZR} & \frac{1}{2}\gamma_{Z\theta} & \varepsilon_Z \end{pmatrix},$$

где  $\sigma_R, \sigma_{\theta}, \sigma_Z$  — радиальное, тангенциальное и осевое нормальные напряжения соответственно;

$\tau_{RZ}, \tau_{R\theta}, \tau_{Z\theta}$  — касательные напряжения;

$\varepsilon_R, \varepsilon_{\theta}, \varepsilon_Z$  — радиальная, тангенциальная и осевая деформации соответственно;

$\gamma_{RZ}, \gamma_{R\theta}, \gamma_{Z\theta}$  — угловые деформации.

Интегральными характеристиками напряженно-деформированного состояния в рассматриваемой точке деформируемой заготовке являются:

1. интенсивность напряжений

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_R - \sigma_{\theta})^2 + (\sigma_{\theta} - \sigma_Z)^2 + (\sigma_Z - \sigma_R)^2 + 6(\tau_{R\theta}^2 + \tau_{\theta Z}^2 + \tau_{ZR}^2)}.$$

2. интенсивность деформаций

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_R - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_Z)^2 + (\varepsilon_Z - \varepsilon_R)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{R\theta}^2 + \gamma_{\theta Z}^2 + \gamma_{ZR}^2)}.$$

По этим характеристикам можно определить зоны интенсивной и затрудненной пластической деформации.

Основной вид напряженного состояния заготовки в главных осях — трехосное сжатие с напряжениями, радиальным  $\sigma'_R$ , направленным к оси прессования, тангенциальным  $\sigma'_\theta$ , направленным по касательной к центральной окружности, проходящей через рассматриваемую точку и осевым напряжением  $\sigma'_Z$ , направленным вдоль оси прессования. За счет напряжений металл выдавливается через матрицу, получая в поперечном сечении заготовки две главные деформации укорочения  $\varepsilon'_R$  и  $\varepsilon'_\theta$  и одну главную деформацию удлинения  $\varepsilon'_Z$  в направлении оси прессования, рис. 28.

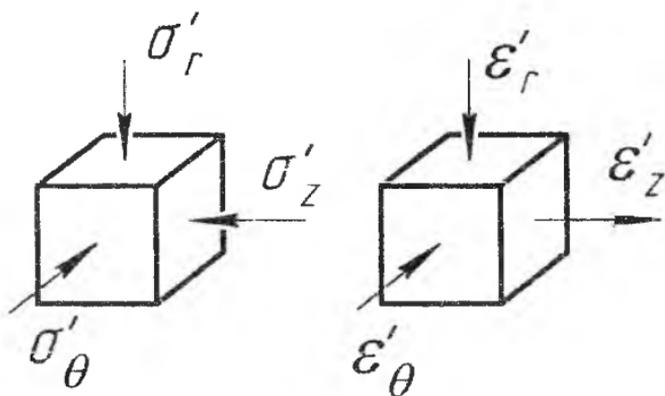


Рис. 28. Схема главных напряжений и деформаций при прессовании

На некоторых участках заготовки при прессовании могут возникнуть осевые растягивающие напряжения.

В очаге пластической деформации внутренние слои двигаются быстрее периферийных. В результате появляются дополнительные

напряжения: в периферийных слоях растягивающие, так как каждый внутренний слой, двигаясь быстрее соседнего внешнего, увлекает его за собой, а во внутренних – сжимающие, так как каждый внешний слой сдерживает движение соседнего внутреннего. В следствие стремления к выравниванию напряжений возникает зона наружных слоев с дополнительными осевыми напряжениями растяжения, уменьшающимися по направлению от периферии к оси, и зона внутренних слоев с дополнительными осевыми напряжениями сжатия, увеличивающимися к оси.

В зоне внутренних слоев дополнительные напряжения сжатия, налагаясь на основные напряжения сжатия, не изменяют вида напряженного состояния металла: всестороннего неравномерного сжатия. В зоне наружных слоев дополнительные напряжения растяжения, налагаясь на основные осевые напряжения сжатия, уменьшают их, а при некоторых условиях, становятся больше основных осевых напряжений сжатия, изменяют вид напряженного состояния металла и переводят всестороннее неравномерное сжатие в двухстороннее (поперечное) сжатие и продольное растяжение. Зоны с разноименными напряжениями находятся ближе к выходу из очага пластической деформации, так как по направлению к выходу основные напряжения падают.

При прессовании во всех участках деформируемой заготовки, кроме очага пластической деформации, тангенциальные и радиальные главные деформации практически равны. Это определяет приближенное равенство тангенциальных и радиальных главных нормальных напряжений  $\sigma'_\theta \approx \sigma'_r$ . В соответствии с законом наименьшего сопротивления на всех участках прессуемого объема, кроме очага пластической деформации,  $|\sigma'_z| > |\sigma'_r|$ , а в очаге пластической деформации, не считая участков с растягивающими осевыми напряжениями  $|\sigma'_z| < |\sigma'_r|$ .

Таким образом, главное осевое напряжение убывает по направлению от пресс-шайбы к входу в очаг пластической деформации и дальше к выходу из него. Соответственно убывают тангенциальные и радиальные главные нормальные напряжения.

## 2.4 Силовой режим прессования

Усилие, приложенное к пресс-шайбе, необходимое для выдавливания металла заготовки через отверстие в матрице, называют усилием прессования. Знание величины усилия необходимо для выбора типа гидропресса, расчёта инструмента на прочность установление работы и мощности  $N$  пластической деформации при прессовании.

Работа пластической деформации при прессовании определяется на индикаторной диаграмме (усилие – ход пресс-шайбы) площадью, заключённой между кривой  $P$  и осью абсцисс на основной стадии процесса (рис. 29.), т.е.

$$A = \int_0^{L_0 - H} P(h) dh$$

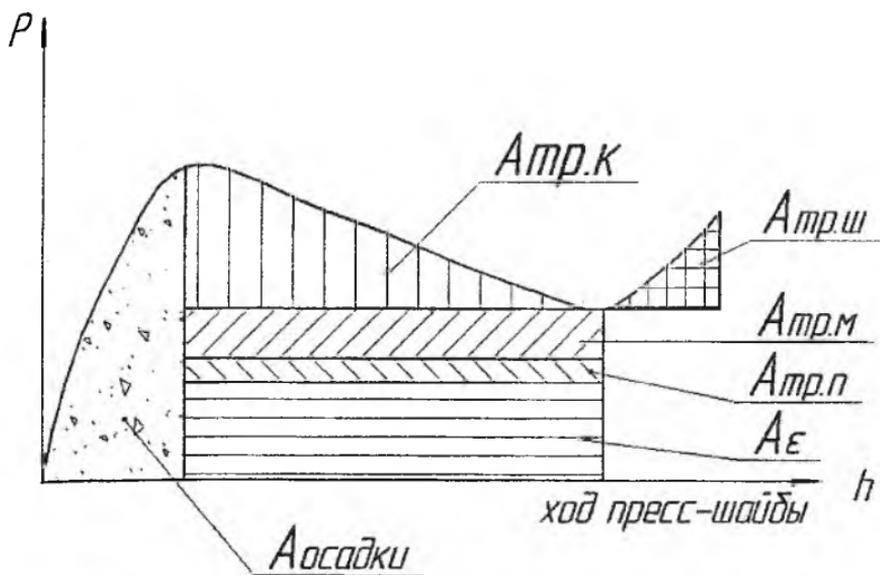


Рис. 29. Структура энергзатрат при прямом прессовании

В общем виде полная работа  $A$  при прямом прессовании профилей с прямым истечением может быть представлена в виде суммы работ:

$$A = A_{\epsilon} + A_{тр.к.} + A_{тр.м.} + A_{тр.п.}$$

где  $A_{\epsilon}$  — работа пластической деформации,  $A_{тр.к.}$ ,  $A_{тр.м.}$ ,  $A_{тр.п.}$  — работа сил трения по поверхности контейнера, матрицы и пояска матрицы соответственно.

Исходя из рассмотренной структуры энергзатрат полное усилие прессования  $P$  на основной стадии можно записать в виде суммы составляющих:

$$P = R_m + T_{кр} + T_m + T_{п.},$$

где  $R_m$  — усилие, необходимое, для осуществления пластической деформации без учёта сил трения;  $T_{кр}$ ,  $T_m$ ,  $T_{п.}$  — усилия, необходимые для преодоления сил контактного трения по поверхности контейнера, матрицы и пояска матрицы соответственно, рис. 30.

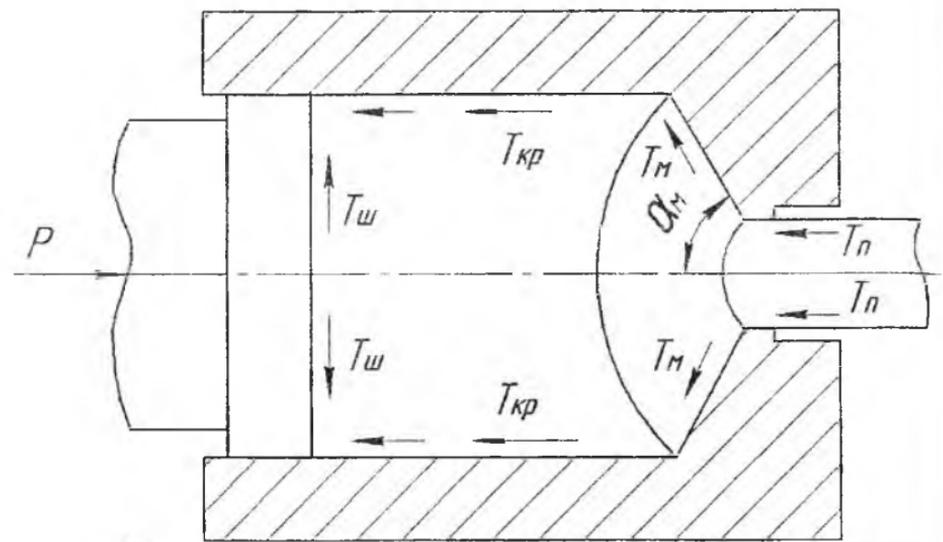


Рис. 30. Схема активных и реактивных сил

На основной стадии прессования составляющая  $T_{кр}$  убывает из-за уменьшения длины заготовки. На заключительной стадии появляется составляющая  $T_{ш}$  – усилие, необходимое для преодоления сил трения по поверхности пресс-шайбы, что приводит к росту усилия  $P$  (см рис. 29.).

Эта формула предложена И.Л. Перлиным. Она наиболее распространена на производстве, так как обеспечивает достаточно высокую точность при проведении технологических расчётов усилия прессования.

При выводе формулы приняты следующие допущения.

1. Для горячего прессования напряжения трения по контактным поверхностям инструмента описывают законом Зибеля:

$$\tau_{кр} = \mu_{кр} S_{д.кр},$$

$$\tau_{м} = \mu_{м} S_{д.с},$$

$$\tau_{п} = \mu_{п} S_{д.к},$$

где  $\mu_{кр}$ ,  $\mu_{м}$ ,  $\mu_{п}$  – коэффициенты трения по контактным поверхностям контейнера, матрицы и калибрующего пояса соответственно;

$S_{д.кр.}$ ,  $S_{д.с.}$ ,  $S_{д.к.}$  – сопротивление деформации металла заготовки около контейнера, в очаге пластической деформации и на калибрующем пояске соответственно.

2. При прессовании в конические матрицы с углом  $\alpha_m$  в качестве верхней и нижней границ очага пластической деформации приняты сферические поверхности.

3. Вывод формулы для расчёта составляющей  $R_m$  основан на решении приближённого уравнения равновесия и условия пластичности.

Выделим в очаге пластической деформации элементарный объём, ограниченный двумя бесконечно близкими концентрическими сферическими поверхностями  $F_z$  и  $F_z + dF_z$ , рис. 31.

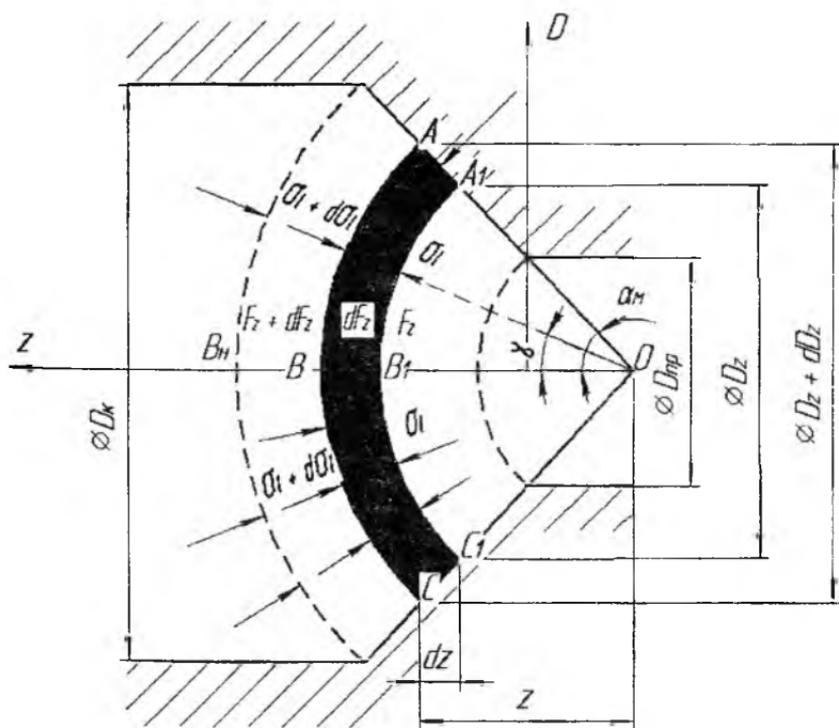


Рис. 31. Схема очага пластической деформации

Будем считать, что касательные напряжения на участках  $AA_1$  и  $CC_1$  отсутствуют. Они также равны нулю и на оси симметрии  $z$  и незначительны на участках  $AB$  и  $BC$ ,  $A_1B_1$ , и  $B_1C_1$ . Поэтому выделенные поверхности могут являться поверхностями главных радиальных напряжений  $\sigma_r$  и главных нормальных напряжений  $\sigma_l$ .

Составим уравнение равновесия выделенного элементарного объёма в направлении от прессования, приняв допущение, что напряжение  $\sigma_l$  равномерно распределено по сферическим поверхностям.

$$(\sigma_l + d\sigma_l) \iint_{ABC} \cos \gamma dF_z - \sigma_l \iint_{A_1B_1C_1} \cos \gamma dF_z - \sigma_r \pi D_z dz \operatorname{tg} \alpha = 0$$

Откуда

$$(\sigma_l + d\sigma_l) \frac{\pi}{4} (D_z + dD_z)^2 - \sigma_l \frac{\pi}{4} D_z^2 - \sigma_r \pi D_z dz \operatorname{tg} \alpha = 0$$

Примем  $dz = dD_z / (2 \operatorname{tg} \alpha)$  и условие пластичности  $\sigma_r = S_{л.с.} + \sigma_l$ , отбросив бесконечно-малые второго порядка, получим дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными.

$$d\sigma_l = 2S_{л.с.} \frac{dD_z}{D_z}$$

Граничные условия: при  $D_z = D_{np}$  -  $\sigma_l = 0$ , при  $D_z = D_k$  -  $\sigma_l = \sigma_{ln}$

$$\int_0^{\sigma_{ln}} d\sigma_l = 2S_{л.с.} \int_{D_{np}}^{D_k} \frac{dD_z}{D_z} = 2S_{л.с.} \ln D_z \Big|_{D_{np}}^{D_k} = S_{л.с.} \ln \frac{D_k^2}{D_{np}^2} = S_{л.с.} \cdot i,$$

где  $i$  - интегральный показатель деформации.

Окончательно  $\sigma_{ln} = S_{л.с.} \cdot i$ . Напряжение  $\sigma_{ln}$  в различных точках сферической поверхности  $A_n B_n C_n$  имеют разные направления по соответствующим радиусам к центру  $O$ .

Для определения силы  $R_m$ , действующей в направлении от прессования, необходимо найти в каждой точке поверхности  $A_n B_n C_n$  элементарные силы  $dR_{zn}$ , действующие в направлении от  $OZ$ , которые б

создавали в каждой из этих точек напряжения  $\sigma_{1n}$ , направленные к центру  $O$ . Для этого берём на сферической поверхности  $A_n B_n C_n$  произвольную точку, расположенную под углом  $\gamma$ , рис. 32.

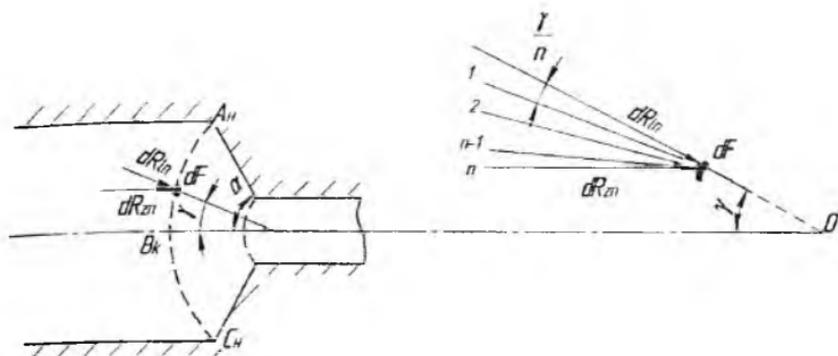


Рис. 32. Схема к расчёту силы  $R_m$

В окрестностях этой точки на площадке  $dF$ , действует элементарная сила  $dR_{1n}$ , направленная по радиусу и равная:

$$dR_{1n} = \sigma_{1n} dF$$

Определим связь между  $dR_{1n}$  и  $dR_{2n}$ . Для этого разделим угол  $\gamma$ , заключённый между  $dR_{1n}$  и  $dR_{2n}$ , на  $n$  равных частей. Из рис. 32. следует:

$$dR_{1n} = \frac{dR_{1n}}{\cos \frac{\gamma}{n}}$$

$$dR_{2n} = \frac{dR_{1n}}{\cos \frac{\gamma}{n}} = \frac{dR_{1n}}{\cos^2 \frac{\gamma}{n}}$$

...

$$dR_{2n} = \frac{dR_{1n}}{\cos^n \frac{\gamma}{n}}$$

При  $n \rightarrow \infty \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \cos^n \frac{\gamma}{n} = 1$ . Тогда  $dR_{1n} = dR_{2n}$ .

Суммируя элементарные силы  $dR_{1n}$  по поверхности шарового сегмента  $A_n B_n C_n$  численно равной  $\frac{F_k}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}$ , получим искомую силу

$$R_M = \sigma_{ln} \iint_{A_{\pi} S_{\pi} C_{\pi}} dF = \frac{F_k}{\cos^2 \frac{\alpha}{2}} S_{\pi, c t}$$

Для определения  $R_M$  при прессовании через плоскую матрицу принимается  $\alpha_M = 60^\circ$  □.

Прессование профилей некруглых поперечных сечений приводит к дополнительным усилиям для осуществления их формоизменения из круглой заготовки, рис. 33.

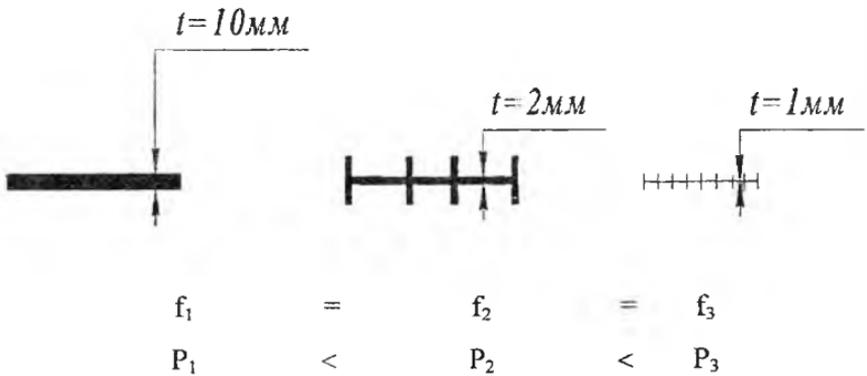


Рис. 33. Влияние сложности сечения профиля на усилие прессования

Дополнительная деформация от формоизменения равновеликого по площади круга в заданный профиль пропорциональна.

$$i_{\text{доп}} \sim \ln \frac{a_{\text{ср.кр}}}{a_{\text{ср.пр}}}, \text{ где } a_{\text{ср.кр}} = \frac{\pi D_{\text{равн.кр}}^2}{4 D_{\text{равн.кр}}}, \frac{f_{\text{пр}}}{\sqrt{4 f_{\text{пр}} / \pi}} \sqrt{f_{\text{пр}}}$$

Так как на входе в очаг деформации  $i_{\text{доп}} = 0$ , на выходе из него  $i_{\text{доп}} = i_{\text{макс}}$ , то берётся среднее значение  $i_{\text{доп}}$

$$i_{\text{доп}} = \frac{1}{2} \ln \frac{a_{\text{ср.кр}}}{a_{\text{ср.пр}}} = \ln \sqrt{\frac{a_{\text{ср.кр}}}{a_{\text{ср.пр}}}} = \ln \sqrt{\frac{f_{\text{пр}}}{a_{\text{ср.пр}}^2}}$$

Для нахождения средней толщины профиля его разбивают на прямоугольные участки равной толщины и находят среднюю толщину, рис. 34.

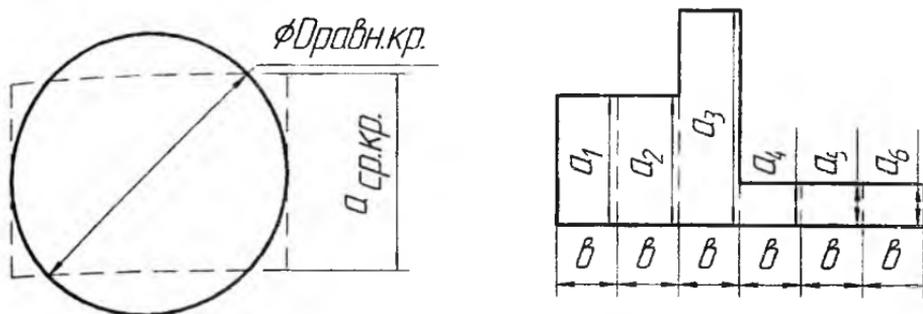


Рис. 34. Схемы к расчёту  $i_{\text{жоп}}$

Усилие, необходимое для преодоления сил трения по поверхности контейнера

$$T_{\text{кр}} = \pi D_k (L_p - h_{\text{упр}}) \mu_{\text{кр}} S_{\text{д.кр}},$$

где:  $L_p$  — длина распрессованной заготовки;

$h_{\text{упр}}$  — высота очага пластической деформации,  $h_{\text{упр}} = (0,15 - 0,25) D_k$

$S_{\text{д.кр}}$  — сопротивление деформированию поверхностных слоёв заготовки

$$S_{\text{д.кр}} = \alpha S_{\text{д.в.}}$$

$\alpha$  - коэффициент, учитывающий захлаживание,  $\alpha = 1 - 1,5$

Для профилей некруглых сечений  $D_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{4f_{\text{кр}}}{\pi}}$

Вывод формулы для расчёта составляющей  $T_m$  основан на равенстве мощностей активных и реактивных сил.

Выделим в очаге пластической деформации элементарный объём толщиной  $dz$  находящийся на расстоянии  $z$  от начала координат,

образуемой двумя concentрическими сферическими поверхностями, рис. 35.

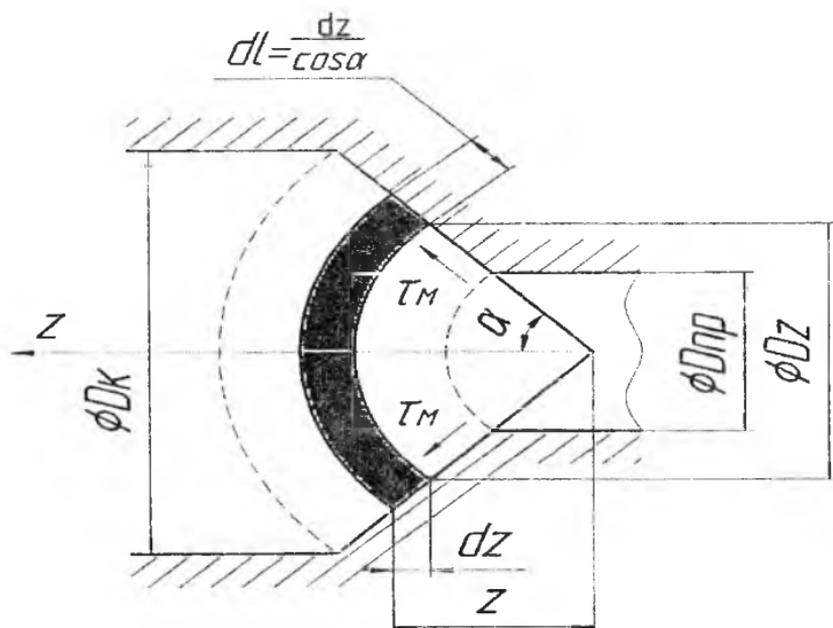


Рис. 35. Схема к расчёту составляющей усилия прессования  $T_M$

Боковая поверхность элементарного слоя

$$dF = \pi D_z dl = \pi D_z \frac{dz}{\cos \alpha}$$

Из условия постоянства ссекундных объёмов.

$$v_z = V_{np} \frac{D_k^2}{D_z^2}$$

Мощность реактивных сил трения на боковой поверхности элементарного слоя.

$$dN_z = \pi D_z \frac{dz}{\cos \alpha} \mu_{\text{д.с}} V_{np} \frac{D_k^2}{D_z^2}$$

Используя зависимость

$$z = \frac{D_z}{2 \operatorname{tg} \alpha}, \quad dz = \frac{dD_z}{2 \operatorname{tg} \alpha}$$

получим

$$dN_z = \frac{\pi D_k^2}{2 \sin \alpha} \frac{dD_z}{D_z} \mu_m S_{\Delta, c} V_{\text{пр}}$$

После интегрирования по всей боковой поверхности конуса матрицы, имеем

$$N_z = V_{\text{пр}} S_{\Delta, c} \mu_m \frac{\pi D_k^2}{2 \sin \alpha} \int_{D_{\text{пр}}}^{D_k} \frac{dD_z}{D_z} = \mu_m S_{\Delta, c} \frac{\pi D_k^2}{\sin \alpha} \cdot \frac{1}{4} \ln \lambda$$

Мощность активных сил  $T_M V_{\text{пр}}$  Из равенства мощностей активных и реактивных сил:

$$T_M = \pi S_{\Delta, c} \mu_m \frac{D_k^2 i}{4 \sin \alpha}$$

Эту формулу можно распространить и на процесс прессования сложных профилей, приравняв сечение профиля равновеликому кругу.

Аналогично выводится формула для расчёта составляющей усилия  $T_{\text{п}}$ .

$$T_{\text{п}} = \mu_{\Delta} S_{\Delta, k} \lambda \Pi l,$$

где  $\Pi$  — периметр канала матрицы,

$l$  — ориентировочная длина пояса,  $l = 5 \text{ мм}$ .

С увеличением угла конуса матрицы  $\alpha_m$  растут дополнительные сдвиги, а с ними составляющие  $R_m$ , рис. 36. Одновременно уменьшается контактная поверхность боковой границы очага пластической деформации, а с ней и составляющая  $T_m$ , поэтому при изменении угла  $\alpha$ , образуется зона минимальных значений  $R_m + T_m$ .

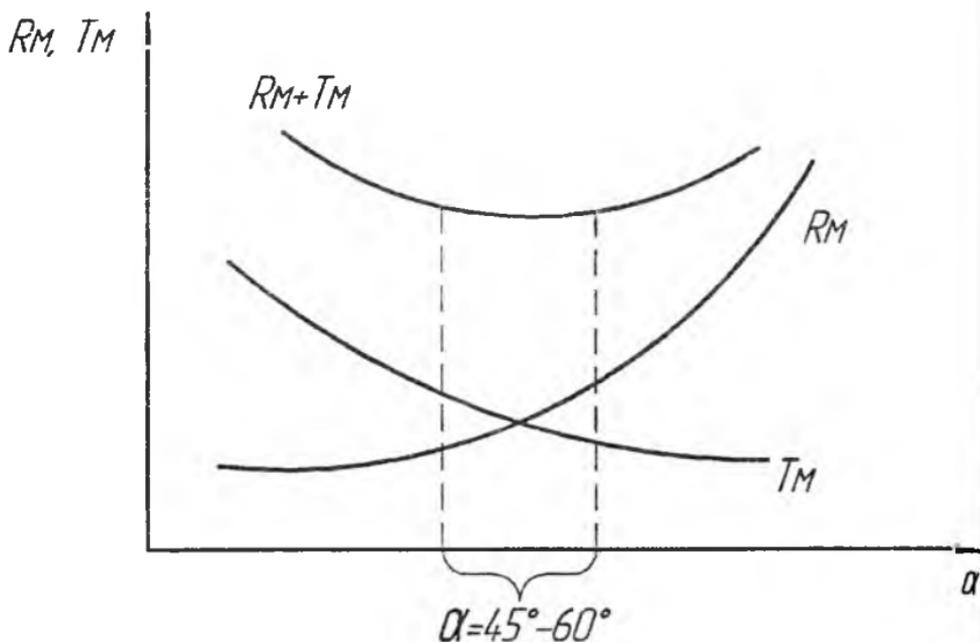


Рис. 36. Влияние угла конуса матрицы на составляющие полного усилия прессования  $R_M$  и  $T_M$

## 2.5 Деформируемость металла при прессовании без разрушения

Как показывает практика, пластическая деформация сопровождается возникновением и развитием трещин. Этот тезис положен в основу теории разрушения металлов при обработке металлов давлением, разработанной В.Л. Колмогоровым. Он предложил ввести скалярную величину  $\psi$  (трещиноватость), характеризующую поражённость элементарного объёма микродефектами. Принято, что приращение  $d\psi$  за малый промежуток времени  $dt$ :

$$d\psi = \frac{d\lambda}{\lambda_p},$$

где  $d\lambda$  - приращение степени пластической деформации,

$\Lambda_p$  - предельная для данного прессуемого металла степень пластической деформации.

Степень пластической деформации металла без разрушения – это вся накопленная частицей металла пластическая деформация в течении некоторого отрезка времени  $t$ , подсчитываемая с момента возникновения пластического течения до данного момента вдоль траектории движения частицы.

$$\Lambda = \int_0^t H dt$$

где  $H$  – интенсивность скоростей деформаций сдвига, записанная в декартовой системе координат.

$$H = \sqrt{\frac{2}{3}[(\xi_x - \xi_y)^2 - (\xi_y - \xi_z)^2 + (\xi_z - \xi_x)^2] + \xi_{xy}^2 + \xi_{yz}^2 - \xi_{zx}^2}$$

Здесь  $\xi_x, \xi_y, \xi_z, \xi_{xy}, \xi_{yz}, \xi_{zx}$  – линейные и угловые скорости деформаций.

$$\xi_x = \frac{\partial v_x}{\partial x},$$

$$\xi_{xy} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x},$$

$$\xi_y = \frac{\partial v_y}{\partial y},$$

$$\xi_{yz} = \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y},$$

$$\xi_z = \frac{\partial v_z}{\partial z},$$

$$\xi_{zx} = \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z},$$

где  $v_x, v_y$  и  $v_z$  – проекции скорости перемещение частицы металла на координатные оси.

Для данного металла и заданных температурно-скоростных условий пластичность зависит от напряжённого состояния. Для количественной оценки напряжённого состояния может быть использован показатель:

$$K = \frac{\sigma}{T},$$

где  $\sigma$  – среднее напряжение,  $\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$ ;

$T$  – интенсивность касательных напряжений.

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

Здесь  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  - значения нормальных и касательных напряжений.

Условия пластического деформирования металла без разрушения имеет вид:

$$\psi - \int_0^{\dot{\epsilon}} \frac{H}{\Lambda_p} dt < 1$$

Параметр  $\psi$ , характеризующий степень использования запаса пластичности металла, изменяется в пределах  $0 < \psi < 1$ . При  $\psi = 1$  наступает момент разрушения.

Предельная для прессуемого металла степень пластической деформации  $\Lambda_p$  находится экспериментальным путём по диаграмме пластичности, рис. 37.

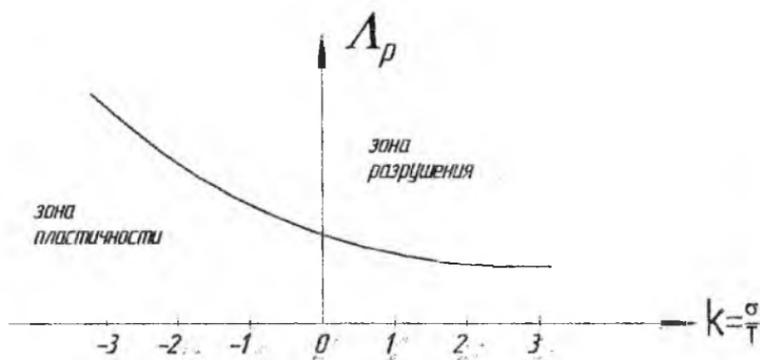


Рис. 37. Схема диаграммы пластичности

Чтобы провести расчёт степени использования запаса пластичности металла и определить возможность разрушения металла при прессовании необходимо последовательно решить ряд задач. Прежде всего, нужно определить напряжённое и деформированное состояние металла. Для это

необходимо определить траектории движения частиц в очаге деформации, а также значения интенсивности скоростей деформации сдвига  $\dot{\gamma}$  и показателя напряжённого состояния  $\sigma/T$  вдоль этих траекторий.

При прессовании накопленная степень пластической деформации достигает наибольших значений на выходе из очага пластической деформации для периферийных слоёв, а параметр  $\sigma/T$  - наименьших значений. Поэтому разрушение металла наиболее вероятно на выходе из очага пластической деформации в поверхностных слоях пресс - изделия.

Найдём при прессовании из цилиндрической заготовки радиусом  $R_k$  круглого профиля радиусом  $R_n$  со скоростью  $V_{пр}$  накопленную степень пластической деформации  $A$  для периферийного слоя. Примем очаг пластической деформации в виде усечённого конуса, а течение металла в очаге деформации радиальным (рис. 38.).

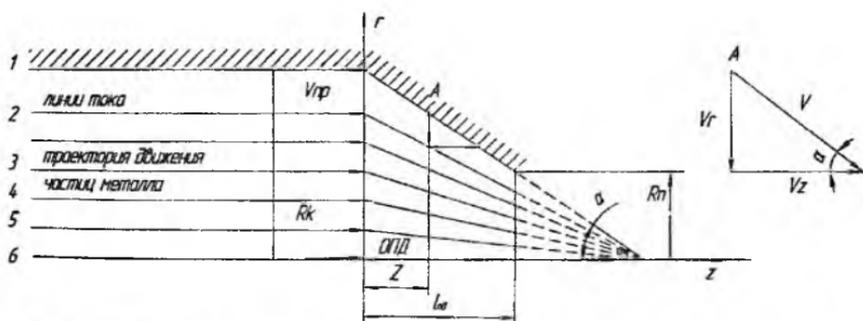


Рис. 38. К расчёту накопленной степени пластической деформации

Траектория периферийного слоя (1) совпадает с конусом матрицы с углом  $\alpha$ . Её уравнение:  $r = R_k - z \operatorname{tg} \alpha$

Из условия равенства секундных объёмов в сечении  $z$ , осевая скорость:

$$V_z = \frac{V_{пр} R_k^2}{(R_k - z \operatorname{tg} \alpha)^2}$$

Радиальная скорость:  $V_r = -V_z \operatorname{tg} \alpha$ .

Скорость деформаций:  $\xi_z = \frac{2V_{\text{сп}} R_k^2 \operatorname{tg} \alpha}{(R_k - z \operatorname{tg} \alpha)^2} = -\xi_r$

Интенсивность скоростей деформации сдвига можно найти по приближённой формуле:

$$H \cong 1,08(\xi_z - \xi_r) = \frac{4,32V_{\text{сп}} R_k^2 \operatorname{tg} \alpha}{(R_k - z \operatorname{tg} \alpha)^2}$$

Накопленная степень деформации за промежуток времени  $t = \frac{z}{v_z}$  при переходе к новой переменной  $z$  при длине очага пластической деформации  $l_{00}$ .

$$\Lambda = \int_0^z H dt = 4,32 \int_0^{\frac{z}{v_z}} \frac{d(R_k - z \operatorname{tg} \alpha)}{R_k - z \operatorname{tg} \alpha} = 2,16 \ln \lambda$$

Если  $\frac{\Lambda}{\Lambda_p} < 1$ , то металл при прессовании деформируется без трещин.

## 2.6 Остаточные напряжения

Прессование приводит к появлению в профилях остаточных напряжений, которые вызывают коробление, скрутку, продольную и поперечную кривизну, трещины. Основная причина появления остаточных напряжений – неравномерность деформаций.

В большинстве случаев при прессовании главная деформация удлинения больше в периферийных слоях, чем в центральных. После прессования знак деформации при разгрузке изменяется в противоположный. В периферийных слоях профиля возникают деформации укорочения. Так как центральные слои сдерживают упругое сокращение периферийных, то периферийные слои остаются в растянутом положении. В результате в пресс-изделии в центральных слоях возника...

продольные остаточные напряжения сжатия  $\sigma_l^{ост}$ , а в периферийных растяжение, рис. 19.

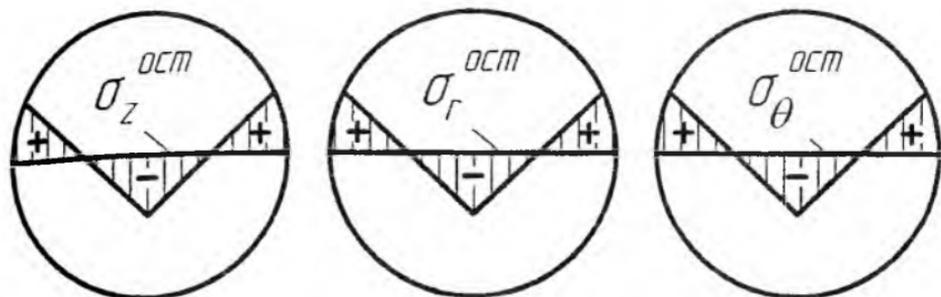


Рис. 39. Распределение остаточных напряжений

После прессования диаметр прутка несколько увеличивается из-за действия остаточных радиальных напряжений  $\sigma_r$ . На поверхности прутка  $\sigma_r^{ост}=0$ . Внутри слои металла действуют друг на друга подобно трубам, собранным с натягом.

Под действием остаточных радиальных напряжений в периферийных слоях тангенциальные остаточные напряжения растягивающие, так как они подвержены действию внутреннего давления. А поскольку остаточные напряжения уравновешены внутри прутка, то внутренние слои испытывают действие сжимающих тангенциальных напряжений.

## 2.7 Вопросы для самоконтроля

1. Опишите напряжённо-деформированное состояние при прессовании.
2. Какие силы при прессовании являются активными, реактивными?
3. Для чего выполняют распрессовку заготовки?

4. Перечислите основные стадии прессования.
5. Почему на заключительной стадии усилие прессования начинает расти?
6. Как образуется центральная пресс-утяжина?
7. Как распределены деформации на основной стадии процесса прессования?
8. Какие показатели используют для оценки деформированного состояния при прессовании?
9. Какие факторы оказывают влияние на деформированное состояние при прессовании?
10. Как угол конуса канала матрицы влияет на усилие прессования?
11. От каких параметров зависит усилие прессования?
12. Перечислите составляющие баланса работ при расчёте усилия прессования.
13. Как по формуле И.Л. Перлина рассчитать усилие для прессования профилей некруглых поперечных сечений?
14. Почему при описании силовых условий при прессовании используют закон трения Зибеля?
15. Каковы деформации в начальной стадии процесса прессования?
16. По какой причине профили при выходе из матрицы имеют скрутку, продольную и поперечную кривизну?
17. Как распределены остаточные напряжения в профиле?
18. Как по формуле И.Л. Перлина найти усилие при обратном прессовании?
19. Как рассчитывают мощность активных и реактивных сил?
20. Какие составляющие полного усилия прессования находят в основе равенства мощностей активных и реактивных сил?

21. При каких условиях процесс прессования протекает без разрушения металла?
22. В какой части профиля разрушение металла наиболее вероятно?
23. В чём сущность метода координатной делительной сетки?
24. Назовите причину образования «мёртвой» зоны в зоне стыка контейнера с матрицей.
25. Где расположен очаг деформации при прессовании?

## 2.8 Задачи

1. Определить пределы текучести в начале  $\sigma_{ТН}$ , в конце очага деформации  $\sigma_{ТК}$  и среднее по очагу деформации  $\sigma_{ТС}$  при прессовании прутка диаметром  $d$  из контейнера диаметром  $D_k$  при температуре  $T$  со скоростью истечения (табл. 4.). Материал-алюминий АД1 (рис. 40.), матрица плоская.

Табл. 4. Исходные данные для расчетов

| Вариант | $d$ , мм | $D_k$ , мм | $T$ , °С | $V_{ИСТ}$ , мм/с |
|---------|----------|------------|----------|------------------|
| 1       | 35       | 400        | 400      | 1000             |
| 2       | 40       | 400        | 450      | 500              |
| 3       | 14       | 350        | 500      | 100              |
| 4       | 65       | 400        | 400      | 1000             |
| 5       | 24       | 350        | 450      | 500              |
| 6       | 35       | 400        | 500      | 100              |
| 7       | 40       | 400        | 400      | 200              |
| 8       | 80       | 400        | 450      | 300              |
| 9       | 75       | 400        | 500      | 500              |

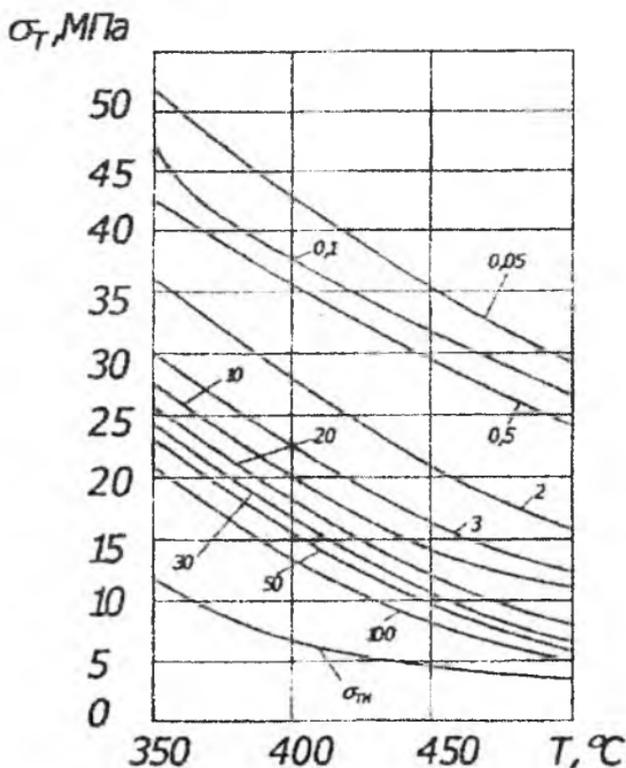


Рис. 40. Зависимость предела текучести от температуры нагрева заготовки  $T_H$ , длительности деформации  $\tau$  для сплава АД 1

2. Определить среднюю температуру профиля при выходе из канала матрицы, если коэффициент вытяжки  $\lambda = 60$ , предел текучести  $\sigma_T = 80$  МПа при температуре нагрева заготовки  $T = 420^\circ \text{C}$ . В расчетах принять  $C = 87$  Дж/(кг·град,  $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$ ).

3. При прессовании профилей из идеально пластического металла ( $\sigma_{TН} = \sigma_{ТК} = \sigma_{ТС} = \sigma_{ТКР} = 50 \text{ МПа}$ ) из контейнера диаметром 130 мм усилие необходимое для преодоления сил трения по контейнеру, составило 2 МН. Найти приближённое значение коэффициента трения  $\mu_{кр}$ , если заготовка имела длину 400 мм.

4. Найти предельную допустимую вытяжку при прессовании в трения в одноканальную матрицу с углом конусности  $60^\circ$  круглого прутка

по данным (табл. 5)

Табл. 5. Варианты заданий

| № Варианта | Диаметр прутка, мм | $\sigma_{ТС}$ , МПа | Пресс. МН |
|------------|--------------------|---------------------|-----------|
| 1          | 30                 | 20                  | 12,0      |
| 2          | 40                 | 30                  | 15,0      |
| 3          | 50                 | 40                  | 20,0      |
| 4          | 60                 | 50                  | 30,0      |

5. Из индикаторной диаграммы для прямого метода прессования заготовки диаметром 200 мм и длиной 600 мм получены следующие значения: максимальное усилие прессования - 21,0 МН, минимальное усилие прессования - 13,0 МН. Определить величину напряжения трения по контейнеру.

6. С увеличением угла конусности матрицы  $\alpha$  сдвиговые деформации возрастают, что приводит к увеличению составляющей полного усилия  $R_M$ , но одновременно уменьшается контактная поверхность и соответственно составляющая  $T_M$ . Найти зону оптимальных углов конусности матрицы при прессовании профиля с площадью поперечного сечения  $300 \text{ мм}^2$ , если сопротивление деформации постоянно по объёму заготовки и равно 60 МПа, коэффициент трения  $\mu_M = 0,2$ ,  $\lambda = 20$ .

7. Определить усилие, необходимое для осуществления дополнительной деформации при прессовании профилей сложной конфигурации (рис. 41) из контейнера диаметром 130 мм, если сопротивление деформации металла  $\sigma_{ТС} = 50$  МПа, угол конусности матрицы  $30^\circ$ .

8. Рассчитать полное усилие прессования прутка из сплава АД1 без смазки с параметрами, приведёнными в табл. 5:  $D_k$  - диаметр контейнера;  $L_p$  - длина распрессованного слитка;  $V_{ист}$  - скорость истечения;  $T$  - температура нагрева заготовки;  $\alpha$  - угол наклона образующей матрицы;  $l_{кал}$

$=0,1d$  - длина калибрующего пояска;  $d$  - диаметр прутка.

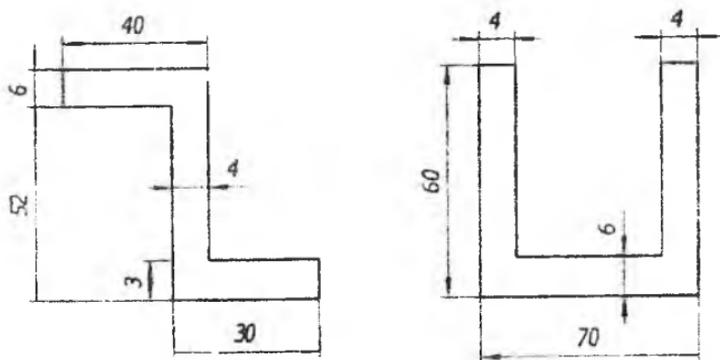


Рис. 41. Сечение профилей

Табл. 5. Значения параметров для расчетов

| Вариант | $D_{к.}$<br>мм | $L_p.$<br>мм | $d,$<br>мм | Метод<br>прессования | $V_{ист.}$<br>мм/с | $T,$<br>°С | $\alpha,$<br>град |
|---------|----------------|--------------|------------|----------------------|--------------------|------------|-------------------|
| 1       | 200            | 400          | 60         | прямой               | 200                | 350        | 90                |
| 2       | 250            | 400          | 50         | прямой               | 500                | 400        | 60                |
| 3       | 150            | 400          | 30         | обратный             | 150                | 500        | 45                |
| 4       | 320            | 640          | 10         | прямой               | 100                | 350        | 60                |
| 5       | 250            | 600          | 70         | обратный             | 300                | 450        | 60                |
| 6       | 300            | 700          | 80         | обратный             | 150                | 500        | 90                |
| 7       | 250            | 600          | 60         | прямой               | 400                | 400        | 45                |
| 8       | 100            | 200          | 30         | прямой               | 150                | 400        | 45                |
| 9       | 400            | 900          | 75         | обратный             | 200                | 450        | 60                |
| 10      | 100            | 300          | 10         | обратный             | 200                | 350        | 60                |

9. Сравнить эффективность по усилию процессов прямого и обратного прессования прутка из сплава АД 1 без смазки по данным табл. 5.

10. Определить минимальный диаметр прутка из сплава АД1 изготавливаемого обратным методом на прессе усилием 12МН в контейнера диаметром 130 мм при  $L_p = 3 D_{к.}$  температуре нагрева заготовки 450°С, скорости истечения 30 м/мин.

### 3 ТЕХНОЛОГИЯ ПРЕССОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ

#### 3.1 Технологическая схема производства профилей

Технологическую схему производства рассмотрим на примере прессования сплошных профилей из алюминиевых сплавов. В этом случае прессование производится по схемам прямого, обратного, изотермического прессования, с активными силами трения и другими способами, рис.4. Чаще всего сплошные профили из алюминиевых сплавов получают горячим прессованием на горизонтальных гидравлических прессах с прямым истечением металла без технологической смазки в одно- и многоканальные матрицы.

Основные достоинства этого метода:

- простота конструкции матрицы с плоским торцом, что важно при изготовлении профилей со сложной формой поперечного сечения;
- затормаживание периферийных слоев заготовки в контейнере вследствие высоких сил трения, что способствует получению чистой поверхности изделий.

Прессование со смазкой контейнера используют в небольшом объеме. Несмотря на такие преимущества, как повышение скорости прессования при производстве профилей из "трудно-деформируемых" сплавов в 2-3 раза и снижение энергозатрат на 35 - 40%, ограниченное применение этого процесса связано с тем, что использование матриц с плоским торцом и маслографитовой смеси в качестве смазки не обеспечивает высокого качества поверхности изделия.

Прессование с обратным истечением резко уменьшает неравномерность деформации и потери на контактное трение, что позволяет увеличить длину заготовок, а, следовательно, и длину

получаемых изделий. Необходимость применения полого пресс-штемпеля и трудность отделения пресс-остатка на прессах существующих конструкций не позволяют этому методу конкурировать с методом прямого истечения. Однако вследствие существенных усовершенствований конструкций прессов применение этого метода в последние годы все более расширяется.

Весьма перспективны для прессования некоторых видов изделий из алюминиевых сплавов следующие разрабатываемые методы:

1. Гидропрессование с непрерывным вводом жидкости высокого давления в длинный контейнер, в который можно поместить слиток длиной в несколько метров.

2. Выдавливание одной заготовки за другой с обеспечением их сварки по поверхности сочленения при использовании вакуумированных контейнеров, что позволит получать профили практически неограниченной длины.

3. Выдавливание одной заготовки за другой без их сварки с применением смазки контейнера, что повышает производительность прессов и облегчает их автоматизацию.

4. Холодное прессование профилей.

Следует учитывать, что одного какого-то "универсального" метода прессования, наиболее предпочтительного для всех видов выпускаемых изделий из алюминиевых сплавов, не существует. Поэтому к выбору метода прессования необходимо подходить дифференцированно и специализировать производство и оборудование на отдельных группах изделий.

Табл. 6. Технологические схемы производства профилей

| Название операции              | Технологическая схема |   |   |   |
|--------------------------------|-----------------------|---|---|---|
|                                | 1                     | 2 | 3 | 4 |
| Нагрев                         |                       |   |   |   |
| Прессование                    |                       |   |   |   |
| Закалка в процессе прессования |                       |   |   |   |
| Правка растяжением             |                       |   |   |   |
| Обрезка концов                 |                       |   |   |   |
| Правка в роликовых машинах     |                       |   |   |   |
| Правка на прессах              |                       |   |   |   |
| Местная ручная правка          |                       |   |   |   |
| Закалка с нагревом в печах     |                       |   |   |   |
| Искусственное старение         |                       |   |   |   |
| Отжиг                          |                       |   |   |   |
| Разка на мерные длины          |                       |   |   |   |
| Контроль качества              |                       |   |   |   |
| Анодирование                   |                       |   |   |   |
| Консервация                    |                       |   |   |   |
| Упаковка                       |                       |   |   |   |

Процесс прессования состоит из технологически однотипных элементов, которые в основном определяют состав и компоновку оборудования для прессования металлов. Обобщенная схема технологического процесса производства профилей включает следующие операции: приемку и складирование заготовок, нагрев, прессование, резку пресс-изделий, термообработку, правку и калибровку, отделку поверхности, контроль и складирование готовой продукции. В табл. 6 приведены широко используемые технологические схемы производства профилей. Схема № 1 применяется для сплавов с низкой скоростью охлаждения при закалке, по которой закалка проводится непосредственно в процессе прессования путем обдува профиля на столе пресса водно-воздушной смесью.

Последовательность выполнения операций на данной и других схемах показана линиями, соединяющими точки, которыми отмечены соответствующие операции.

Разветвления указывают на возможные подварианты данной схемы, которые понятны из таблицы. Схема № 2 является типовой для профилей из сплавов подвергающихся закалке в вертикально-закалочных печах и искусственному старению. Эта схема обеспечивает изготовление профилей с термообработкой и без нее. Схема № 3 используется для производства профилей, прутков и труб в отожженном состоянии. Схема № 4 является типовой для производства профилей периодического по длине поперечного сечения. Характерным для нее является использование операции правки на правильных прессах утолщенной (законцовочной) части профиля.

После прессования или термической обработки профили, как правило, имеют нарушения продольной и поперечной геометрии в виде кривизны, скрутки. Нарушение поперечной геометрии проявляется в искривлении полок профиля, искажении углов в поперечном сечении, непараллельности отдельных элементов профиля.

Нарушения продольной геометрии профилей исправляется растяжением и раскруткой в правильно-растяжных и раскруточных машинах, а также гибкой в роликовых правильных машинах с шахматным расположением роликов. Нарушения поперечной геометрии исправляются в процессе гибки на роликовых правильных машинах фасонными роликами с соосным расположением верхнего и нижнего роликов. В ряде случаев дополнительная правка профилей крупного поперечного сечения осуществляется гибом на гидравлических прессах, а мелкого - вручную с помощью специальных приспособлений.

При растяжении и кручении профиля с остаточной деформацией в процессе пластической деформации устраняются, главным образом плавные искажения продольной геометрии и скрутка. Необходимое усилие для правки растяжением  $P_p$  определяется произведением площади поперечного сечения профиля  $f$  на величину предела текучести материала

профиля  $\sigma_T$ . Для раскрутки профиля требуется крутящий момент  $M_p$ , равный:

$$M = J_n \sigma_T / 2,$$

где  $J_n$  - полярный момент инерции сечения профиля относительно центра тяжести сечения.

Технологический режим правки определяется величиной остаточной деформации удлинения профиля  $\varepsilon_{ост}$ , которая контролируется по величине абсолютного перемещения  $\Delta L$  тянущего захвата правильно-растяжной машины под нагрузкой. Для алюминиевых сплавов обычно рекомендуется  $\varepsilon_{ост}$  порядка 2-4%.

### 3.2 Выбор коэффициента вытяжки и размеров заготовки

Коэффициент вытяжки и размеры заготовки являются важнейшими технологическими параметрами, от которых зависит технико-экономическая эффективность всего процесса прессования. Исходным условием для их определения являются заданные форма и размеры пресс-изделия.

При прессовании профилей обычно используются сплошные цилиндрические заготовки круглого сечения диаметром  $D$  и длиной  $L$ . Оба эти параметра выбираются с учетом обеспечения высокого качества изделия и технико-экономических показателей процесса: производительности, выхода годного и т.д.

Для всех видов прессования целесообразно применять заготовки максимального объема. Чем больше объем заготовки, тем больше соответственно длина пресс-изделия. При этом для прямого метода прессования должно выполняться эмпирическое условие

$$2,0 \leq L/D \leq 4,5 \quad (1)$$

Для обратного метода отношение  $L/D$  берется не более 6 и ограничивается длиной контейнера  $L_K$  ( $L \leq 0,75 L_K$ ), а диаметр  $D$  — усилием прессы.

Рекомендуется, в первую очередь, увеличивать длину заготовки. При слишком большой длине заготовки увеличивается вероятность захлаживания металла к концу прессования, а при слишком малой — уменьшается выход годного и появляется вероятность образования прессутижины.

Основным параметром процесса прессования, определяющим размер заготовки, является коэффициент вытяжки  $\lambda$  или просто вытяжка. Выбор  $\lambda$  производится на основе литературных сведений

$$\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$$

При  $\lambda_{\min} \geq 10$  обеспечивается выравнивание механических свойств материала профиля по всему объему. Для компактных по форме профилей, которые не подвергаются дальнейшей деформации, минимальная вытяжка  $\lambda_{\min}$  должна быть не менее четырех. Вместе с тем прессование с большими вытяжками более производительное, но требует применения больших усилий и вызывает высокие напряжения в прессовом инструменте. В связи с этим  $\lambda_{\max}$  ограничивается усилием прессы. Чем выше пластичность металла, тем больше  $\lambda_{\max}$ .

В связи с этим приходится ограничивать не только минимальное значение вытяжки, но и ее максимальную величину.

Качество тонкостенных профилей обеспечивается практически любой вытяжкой. Ограничивающим условием в этом случае является расстояние от поверхности рабочей втулки контейнера до ближайшей точки канала на матрице.

Как показывает практика, коэффициент  $\lambda$  назначают из опыта и интуиции инженера. Для профилей из алюминиевых сплавов коэффициент вытяжки обычно берут в пределах 15-60. Причем меньшие значения

используют для труднодеформируемых сплавов, большие — для легкодеформируемых сплавов.

Зная площадь поперечного сечения профиля  $f$ , коэффициент вытяжки  $\lambda$  и задавшись числом каналов в матрице  $n$ , определяют ориентировочную площадь поперечного сечения контейнера  $F_{KO}$  и его ориентировочный диаметр  $D_{KO}$ .

$$D_{KO} = 1,13\sqrt{F_{KO}},$$

$$F_{KO} = n\lambda f.$$

По расчетному значению  $D_{KO}$  выбирают ближайший стандартный  $D_K$  по таблице 7. Далее определяют значение фактического коэффициента вытяжки

$$\lambda = \frac{F_K}{fn}, \quad (2)$$

где  $F_K$  — действительная площадь поперечного сечения контейнера,

$$F_K = \frac{\pi D_K^2}{4}$$

Диаметр заготовки должен обеспечить свободный ввод ее в контейнер. Увеличение диаметра заготовки от нагрева составляет  $(0,01-0,012)D$ , зазор между контейнером и заготовкой  $(0,008-0,01)D$ , плюсовой допуск на заготовку  $(0,007-0,013)D$ . С учетом перечисленного  $D \approx (0,965 - 0,975) D_K$ .

Длину заготовки определяют из условия постоянства объема по формуле

$$L = \frac{4[(l + \Delta)m + l_{KO}]}{\pi D^2} n\lambda f + H\lambda_p \quad (3)$$

где  $l$  — длина готового профиля, мм;

$\Delta$  — припуск на длину  $\Delta = (100-300)$  мм;

$l_{KO}$  — длина концевой обрезки,  $l_{KO} = (350 - 600)$  мм;

$H$  – высота пресс-остатка (выбирается в зависимости от диаметра контейнера по таблице 7).

Табл. 7. Исходные данные для выбора типа пресса и размеров заготовки

| Усилие пресса, $P_{пр}$ , МН | Диаметр контейнера $D_k$ , мм | Удельное давление в контейнере $q$ , МПа | Диаметр заготовки $D$ , мм | Минимальное расстояние до крайней точки профиля А, мм | Высота пресс-остатка $H$ , мм | Максимальная длина заготовки $L_{max}$ мм | Максимальная прессуемая длина $L_{max\text{ пр}}$ , мм |
|------------------------------|-------------------------------|--|----------------------------|---|-------------------------------|---|--|
| 7,5                          | 85                            | 1310                                     | 82                         | 15  | 25(15)                        | 400<br>(520)                              | 19000<br>(25000)                                       |
|                              | 95                            | 1020                                     | 92                         | 15  | 25(15)                        |   |  |
|                              | 105                           | 860                                      | 101                        | 15  | 25(15)                        |   |  |
|                              | 115                           | 720                                      | ПО                         | 20  | 25(15)                        |   |  |
| 12                           | 115                           | 1150                                     | ПО                         | 20  | 30(25)                        | 580<br>(750)                              | 25000<br>(33000)                                       |
|                              | 130                           | 910                                      | 125                        | 20  | 30(25)                        |   |  |
| 20                           | 170                           | 890                                      | 162                        | 25  | 40(30)                        | 700<br>(910)                              | 22000<br>(30000)                                       |
|                              | 200                           | 635                                      | 192                        | 25  | 40(30)                        |   |  |
| 25                           | 200                           | 795                                      | 192                        | 25  | 50(40)                        | 800<br>(1100)                             | 30500<br>(40000)                                       |
|                              | 225                           | 625                                      | 217                        | 25  | 50(40)                        |   |  |
| 30                           | 225                           | 750                                      | 217                        | 25  | 50(40)                        | 800<br>(1100)                             | 23000<br>(30000)                                       |
|                              | 250                           | 620                                      | 240                        | 30  | 55(40)                        |   |  |
|                              | 270                           | 520                                      | 258                        | 30  | 60(45)                        |   |  |
| 50                           | 300                           | 705                                      | 285                        | 30  | 75(60)                        | 1000<br>(1300)                            | 23000<br>(30000)                                       |
|                              | 360                           | 490                                      | 345                        | 35  | 80(65)                        |   |  |
|                              | 420                           | 360                                      | 405                        | 35  | 100(75)                       |   |  |
| 120                          | 500                           | 610                                      | 480                        | 50  | 120(125)                      | 1800<br>(2300)                            | 25000<br>(35000)                                       |
|                              | 650                           | 360                                      | 630                        | 65  | 160(125)                      |   |  |
|                              | 800                           | 240                                      | 780                        | 80  | 200(155)                      |   |  |
| 200                          | 650                           | 600                                      | 630                        | 65  | 160(125)                      | 1850<br>(2300)                            | 40000<br>(51000)                                       |
|                              | 800                           | 400                                      | 780                        | 80  | 200(155)                      |   |  |
|                              | 950                           | 282                                      | 925                        | 95  | 250(195)                      |   |  |
|                              | 1100                          | 210                                      | 1070                       | 110   | 300(230)                      |   |  |

Коэффициент распрессовки заготовки  $\lambda_p = F_k/F$ , где  $F$  – площадь поперечного сечения заготовки,  $F = \pi D^2/4$ .

Кратность готовых профилей в одной заготовке

$$m \leq \frac{L_{\text{max пр}}}{l},$$

где  $L_{\text{max пр}}$  – максимально прессуемая длина изделия, определяемая длиной стола прессы по табл. 7.

Далее следует проверка: выдержано ли наиболее рациональное отношение (1). В случае невыполнения изменяют в формулах (2), (3)  $\lambda$ ,  $n$ ,  $m$  и расчет размеров заготовки повторяют.

Масса заготовки  $G = V \cdot \rho$ , где  $\rho$  – плотность материала прессуемого профиля,  $V$  – объем заготовки  $V = FL$ .

### 3.3 Получение заготовки

Качество профилей во многом зависит от качества заготовок, изготавливаемых по следующей технологической схеме, рис. 42.



Рис. 42. Технологическая схема получения литых заготовок

Современный плавильно-литейный агрегат состоит из плавильной печи, миксера и машин для непрерывной разливки металла.

Полунепрерывный метод литья позволяет значительно улучшить качество поверхности и структуру заготовок. Интенсивное охлаждение затвердевающего металла обеспечивает тонко разветвленную структуру растущих дендритов. Основную структуру такой заготовки составляет пластичный твердый раствор с равномерным распределением компонентов сплава и примесей по всему объему слитка.

Внедрение электромагнитного перемешивания металла, находящегося в жидкой ванне кристаллизующейся заготовки, создает движение расплава, позволяет улучшить однородность структуры и свойств металла, ликвацию легирующих элементов сплава.

В последние годы широкое распространение получило бескристаллизаторное литье – литье с электромагнитным кристаллизатором (рис. 43.). Заготовки, отлитые этим способом, имеют очень хорошую наружную поверхность.

Дополнительное выравнивание механических свойств и структуры заготовки осуществляется гомогенизацией – термической обработкой, заключающейся в длительной (до 20 – 40 часов) выдержке заготовок при температуре, близкой к температуре солидуса сплава с последующим охлаждением на воздухе.  $T_{\text{гомог}} = (0,8 - 0,9)T_S$ . Гомогенизация – это высокотемпературный отжиг заготовок.

При гомогенизации диффузионные процессы выравнивают химический состав и механические свойства твердого раствора по объему зерен, растворяют нерасплавленные эвтектики и интерметаллические соединения, размельчают дендритное строение заготовки. В результате уменьшаются литейные напряжения и улучшаются пластические свойства сплава, что позволяет увеличить предельные скорости истечения при прессовании. На поверхности заготовки исключаются загрязнения, несплошности и пористости, грубые ликватные включения. Если поверхность заготовки не удовлетворяет предъявленным требованиям, то заготовку либо обтачивают на токарных, обдирочных станках, либо подвергают операции скальпирования – продавливания заготовки через коническую матрицу с  $\alpha \geq 45^\circ$ , диаметр которой чуть меньше диаметра заготовки, рис. 44.

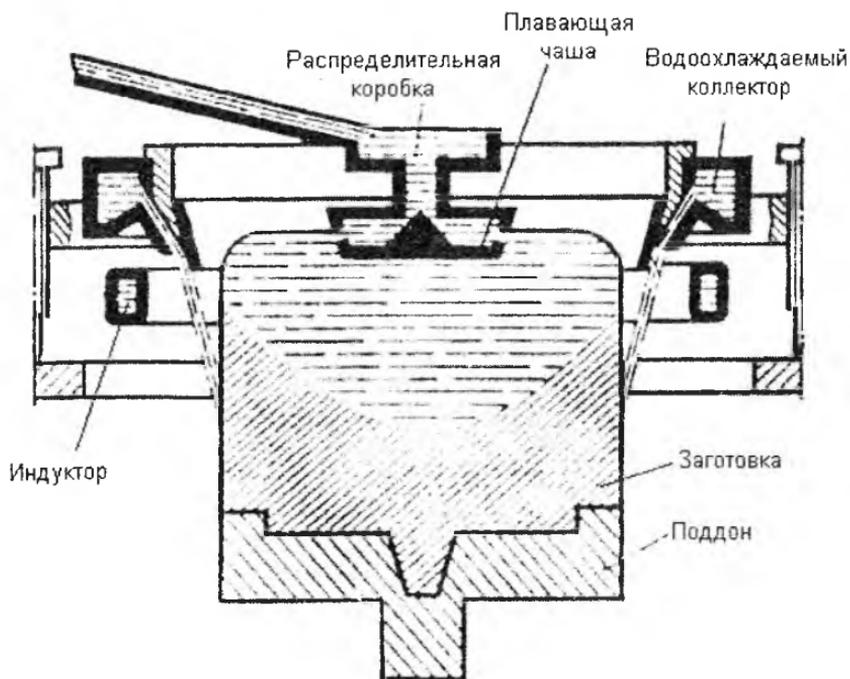


Рис. 43. Схема полунепрерывного литья заготовок с электромагнитным кристаллизатором.

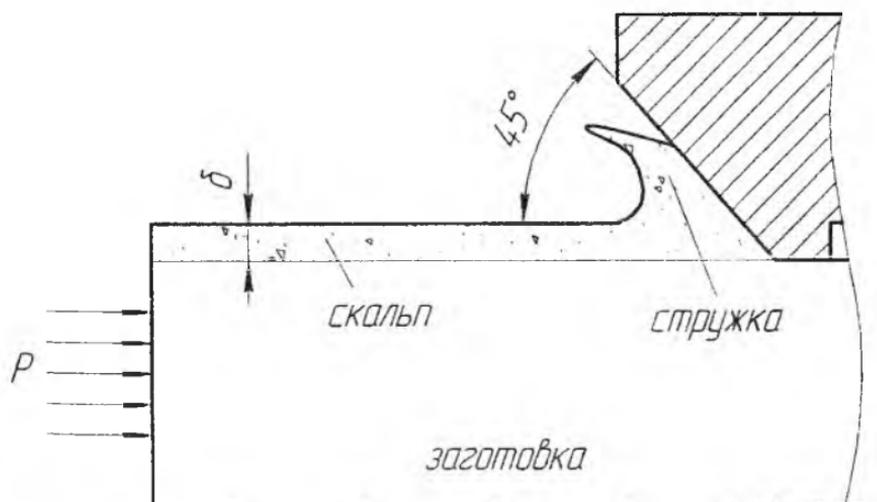


Рис. 44. Схема скальпирования наружной поверхности заготовки

В результате продавливания снимается поверхностный слой (скальп) толщиной  $\delta$ . Скальпирование более эффективно, чем обточка из-за повышения выхода годного, производительности и улучшения качества поверхности. При обточке и скальпировании снимают слой до 5 – 10 мм. Необточенные заготовки пригодны для прессования неотчетственных профилей. Скальпирование целесообразно выполнять на прессе перед загрузкой заготовки в контейнер.

Наиболее часто встречаются дефекты заготовок:

1) Неслитины (неплотности у поверхности заготовки) возникают в результате частичной кристаллизации сплава на открытой поверхности при низкой скорости и температуре литья (рис. 45а).

2) Трещины возникают как в процессе кристаллизации (горячие трещины), так и после полного затвердевания слитка (холодные трещины), рис. 45б.

3) Пористость появляется вследствие усадки (рис. 45в).

4) Неметаллические включения. Наиболее распространенный вид неметаллических включений в алюминиевых сплавах – окись алюминия  $Al_2O_3$ .

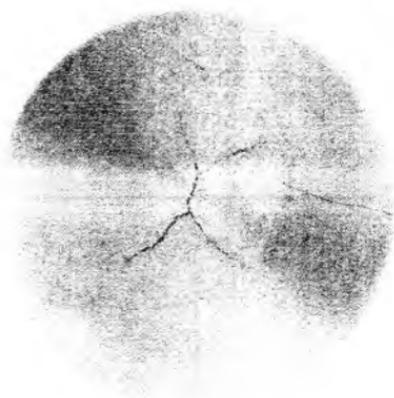
5) Интерметаллидные включения это грубые включения интерметаллидных соединений. Характерны для слитков сплавов, содержащих тугоплавкие элементы. Они представляют собой первичные кристаллы химических соединений Al с тугоплавкими элементами (Mn, Fe, Ni, Cr, Ti), рис. 45г.

6) Светлые кристаллы – это участки алюминиевого твердого раствора, обедненные легирующим элементом (рис. 46а).

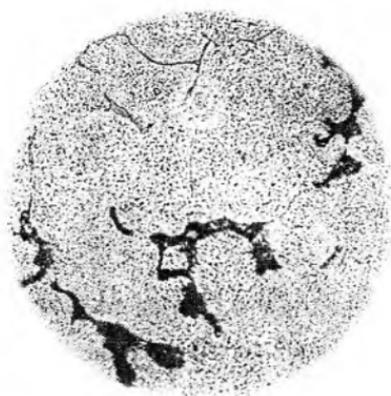
7) Веерная структура – это разновидность столбчатой кристаллизации. Ее называют также пористой, лучевой, узорчатой (рис. 46б).



а)



б)



в)



г)

Рис. 45. Дефекты заготовок при литье:

а – неслитины, б – трещины,

в – пористость, г – интерметаллиды

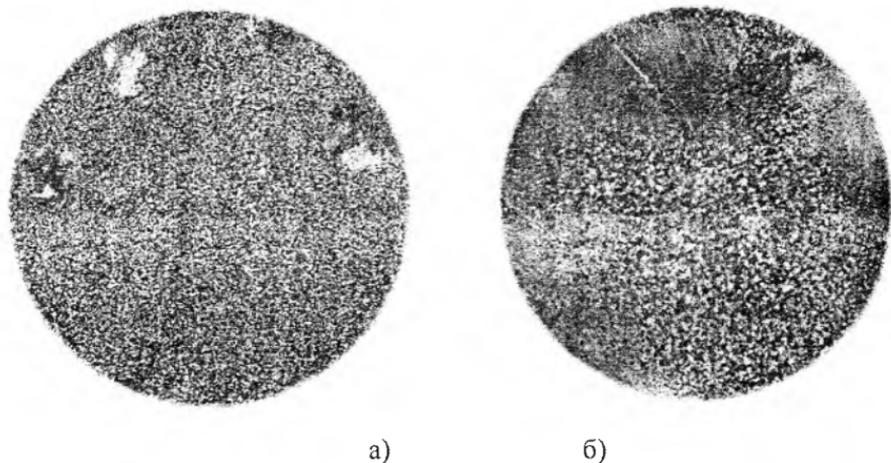


Рис. 46. Дефекты заготовок при литье:  
а – светлые кристаллы, б – веерная структура

### 3.4 Температурно-скоростные условия

Температура нагрева заготовки  $T_3$  и скорость истечения  $V_{ист}$  важные технологические параметры, определяющие качество пресс-изделия. Оба эти параметра тесно связаны между собой. Увеличение скорости истечения повышает температуру заготовки. Поэтому  $T_3$  и  $V_{ист}$  объединяются в одно понятие температурно-скоростной режим прессования.

При выборе температурно-скоростного режима стремятся:

- максимально снизить сопротивление деформации прессуемого материала для уменьшения усилия прессования и нагрузок на инструмент, позволяющих вести процесс прессования с высокими коэффициентами вытяжки;

- обеспечить высокую пластичность металла, позволяющую вести прессование с высокими скоростями истечения;
- поддерживать температуру заготовки не выше критической, превышение которой вызывает потерю пластичности и, как следствие, разрушение пресс-изделий;
- обеспечить получение профилей с требуемой структурой, минимальной разнородностью и заданным уровнем механических свойств.

При прессовании профилей 90-95% энергии, приложенной к заготовке, переходит в тепловую энергию. Эта энергия вызывает местный разогрев металла в отдельных объемах заготовки. В результате температура нагрева может существенно возрасти.

Наибольший разогрев металла заготовки наблюдается в очаге пластической деформации около матрицы. Одновременно с приходом тепла происходит его рассеяние через инструмент, менее нагретый, чем заготовка, рис. 47.

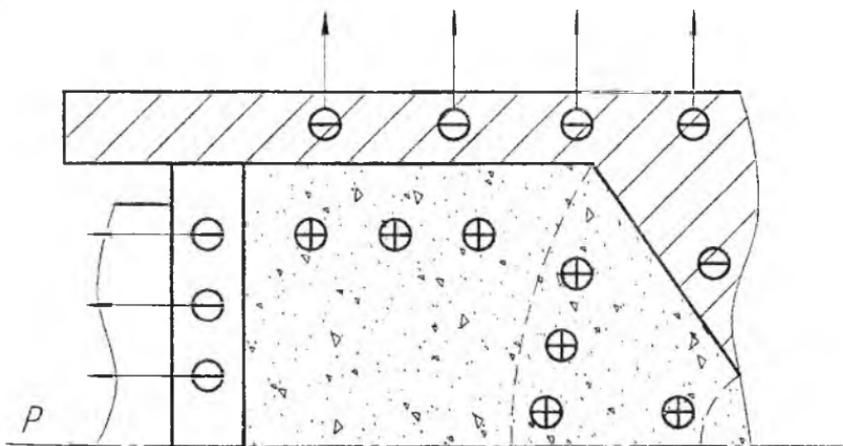


Рис. 47. Схема возникновения и расходования тепла в процессе горячего прессования: "+" - образование тепла; "-" – расходование тепла и. направление теплопередачи

Содержание тепла  $Q$  в прессуемой заготовке

$$Q = Q_0 + Q_\varepsilon + Q_{\text{тр}} - Q_{\text{пр}} - Q_{\text{расс}},$$

где  $Q_0$  – тепло в заготовке перед загрузкой в контейнер;

$Q_\varepsilon$  – тепло за счет перехода работы пластической деформации;

$Q_{\text{тр}}$  – тепло за счет преобразования работы, затрачиваемой на преодоление сил трения;

$Q_{\text{пр}}$  – тепло, уносимое профилем;

$Q_{\text{расс}}$  – тепло, рассеиваемое в окружающую среду.

Разогрев металла в очаге пластической деформации от перехода работы пластической деформации  $A_\varepsilon$  в тепло можно найти из закона сохранения энергии

$$Q_\varepsilon = A_\varepsilon,$$

где  $Q_\varepsilon = C\rho V\Delta T_\varepsilon$ ,  $A_\varepsilon = \eta_{\text{вых}} PV \ln \lambda$

Здесь  $C$  – теплоемкость,  $\rho$  – удельный вес,  $\Delta T_\varepsilon$  – величина разогрева,  $V$  – объем заготовки,  $\eta_{\text{вых}}$  – коэффициент выхода тепла,  $\eta = 0,9 - 0,95$ ,  $\lambda$  – коэффициент вытяжки,  $P$  – давление в контейнере,  $P = P_{\text{пр}}/F_k$

Откуда

$$\Delta T_\varepsilon = \eta_{\text{вых}} \frac{P \ln \lambda}{C\rho} \quad (4)$$

Разогрев металла за счет тепла от работы сил трения найдем следующим образом. Рассмотрим элемент заготовки длиной  $dS$  толщиной  $\delta$  и шириной равной единице, расположенный на расстоянии  $S$  от начальной точки  $O$  линии контакта, рис. 48.

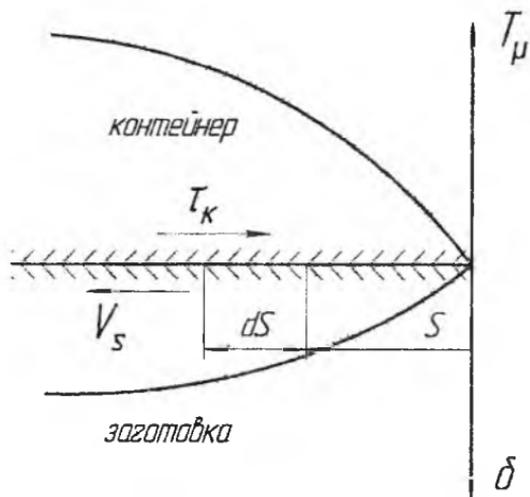


Рис. 48. Движение элемента металла заготовки вдоль линии контакта

Если пренебречь распространением тепла вследствие теплопроводности вдоль движения металла, то при установившемся распределении температуры поток тепла в движущемся элементе в направлении нормали к поверхности контакта в соответствии с законом Фурье является стационарным и одномерным:

$$q_{\mu} = \frac{\lambda}{\delta} T_{\mu}, \quad (5)$$

где  $T_{\mu}$  — повышение температуры вследствие превращения работы трения в тепло;

$q_{\mu}$  — количество тепла, выделяющегося в результате трения;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности.

Тепловой поток, возникающий вследствие трения:

$$q_{\mu} = \tau_k V_s \quad (6)$$

где  $V_s$  — скорость движения металла по контактной поверхности;

$\tau_k$  — напряжение трения,  $\tau_k = \mu 2k$

$k$  — пластическая постоянная.

Из уравнений (5) и (6) находим

$$T_{\mu} = \frac{\mu 2kV_s}{\lambda} \delta \quad (7)$$

Используя линейность соотношения (7), можно установить зависимость между количеством тепла, выделенного вследствие трения, и изменением температуры слоя:

$$\mu 2kSdS = \delta dSc\rho \frac{T_{\mu}}{2},$$

откуда

$$T_{\mu} = \frac{4\mu kS}{c\rho\delta} \quad (8)$$

Исключая из уравнений (7) и (8) толщину слоя, найдем распределение  $T_{\mu}$  вдоль линии контакта:

$$T_{\mu} = \mu 2k \sqrt{\frac{2V_s S}{\lambda c\rho}}$$

Из уравнений (7) и (8) находим выражение для толщины слоя  $\delta$ , в котором температура повышается из-за превращения работы контактного трения в тепло:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\lambda S}{c\rho V_s}}$$

На рис. 48. показаны кривые изменения температуры и толщины слоя.

Изменение температуры во время прессования можно найти по формуле Ю.Л. Стерника

$$\Delta t = \frac{P_0}{c\rho} \gamma - \Delta t_0 \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{8b_1}{\sqrt{\pi}(b_1 + b_2)} \sqrt{\frac{\eta}{P_e}} \right] \right\},$$

где  $P_0$  – напряжение прессования;

$c$  – удельная теплоемкость материала заготовки;

$\rho$  – плотность материала заготовки;

$\Delta t_0$  – начальная разность температур заготовки и контейнера;

$b_1, b_2$  – коэффициент аккумуляции тепла соответственно металла и контейнера,  $b = \sqrt{c\rho k}$ ;

$k$  – коэффициент теплопроводности;

$\eta$  – отношение длины хода пресс-штемпеля к диаметру канала контейнера,  $\eta = h/D$ ;

$P_e = \nu D / a$  – критерий Пекле;

$\nu$  – скорость прессования;

$D$  – диаметр заготовки;

$a = k / (c\rho)$  – коэффициент температуропроводности;

$\gamma = 1,0$  при  $P_e > 5$ ;

$\gamma = 0,3P_e^{0,43} + 0,16\eta$  при  $P_e < 5$ .

По характеру изменения температуры в очаге пластической деформации процесс прессования может протекать следующим образом:

1. Приход тепла больше расхода и как следствие температура заготовки к концу прессования превышает начальную. Такие условия возникают при прессовании с высокими скоростями истечения, например, при холодном прессовании.

2. Приход тепла меньше, чем рассеивается в окружающую среду и процесс идет с уменьшением температуры. Этот случай имеет место при прессовании с небольшими скоростями истечения, например, при прессовании высокопрочных алюминиевых сплавов.

3. Приход тепла равен его расходу и прессование идет с постоянной температурой на выходе из канала матрицы (изотермическое прессование).

Температурный интервал прессования представляет разность минимальной и максимальной температур заготовки, при которых

обеспечивается необходимый комплекс технико-экономических показателей процесса и характеристик качества изделий.

Температурный интервал прессования зависит от физической природы и состава сплавов; состояния заготовки; способа прессования; температурного режима; степени и скорости деформации; допустимых давлений на инструмент; требований к качеству поверхности изделий, к их макро- и микроструктуре, механическим и физико-химическим свойствам; формы поперечного сечения изделий и их размеров; требований к производительности прессов и др.

Даже из этого неполного перечня факторов, влияющих на выбор температурного интервала, видно, что ряд из них характеризуют противоположные тенденции в выборе температуры прессования.

Температурный интервал прессования выбирают так, чтобы при верхних предельных температурах не происходило перегрева или пережога металла, а при нижних - усилие прессования оказалось меньше предельного (паспортного) усилия пресса и обеспечивало требуемое качество структуры пресс-изделия. Температуру нагрева заготовки  $T_{нагр}$ , приводящей к оптимальным условиям прессования, выбирают уменьшая температуру  $T_{пр}$  на величину, равную разогреву от тепла деформации  $\Delta T_{\epsilon}$ , с учетом охлаждения заготовки при переносе в контейнер  $\Delta T_{тр}$ .

$$T_{нагр} = T_{пр} + \Delta T_{тр} - \Delta T_{\epsilon},$$

где  $\Delta T_{тр} = v_{охл} \tau_{тр}$ ,  $v_{охл}$  - скорость охлаждения,  $\tau_{тр}$  - время транспортировки.

В настоящее время еще не найдены методы аналитического отыскания оптимума температурного интервала с учетом влияния всех факторов и предъявляемых требований. Вопрос решается в каждом конкретном случае отдельно. Выбор температурного интервала

производится большей частью экспериментально по диаграммам состояния и пластичности, рис. 49.

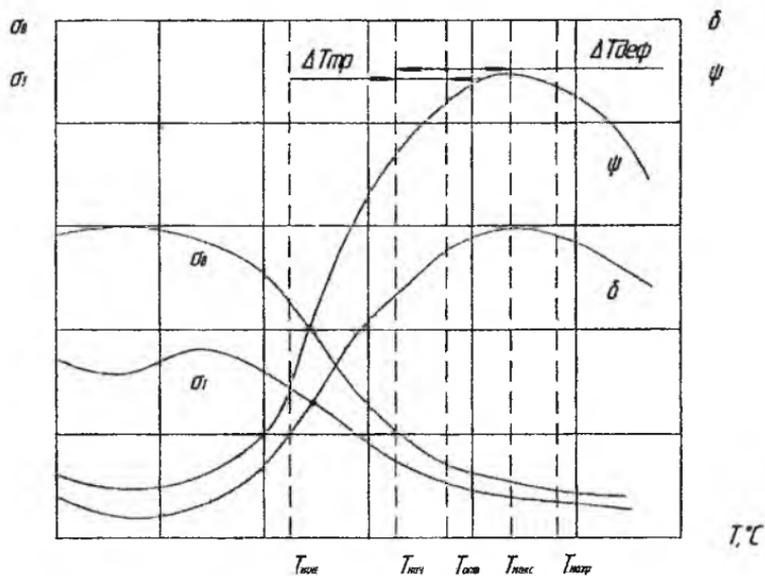
Максимальная температура прессования  $T_{\text{макс}}$  должна соответствовать максимальному значению относительного сужения  $\psi$  и относительного удлинения  $\delta$  при минимальном (или близком к нему) значении предела текучести  $\sigma_T$ . Причем значение этой температуры не должно превышать  $0,9 T_s$ , где  $T_s$  – температура линии солидуса для данного сплава. Нижняя граница интервала должна обеспечивать состояние прессуемого металла в однофазной области.

Критериями, определяющими допустимую скорость истечения металла, служат: начало появления поверхностных трещин, образование рисок, наливов и других поверхностных дефектов, устойчивость геометрических размеров поперечного сечения изделия, начало появления гофров, волнистости и других дефектов. На скорость истечения, кроме того, влияют состав и температура металла в пластической зоне, исходное состояние заготовки, неравномерность деформации, форма и размеры поперечного сечения изделия и соотношение размеров отдельных элементов профиля, конструкция инструмента, способ прессования, условия контактного трения.

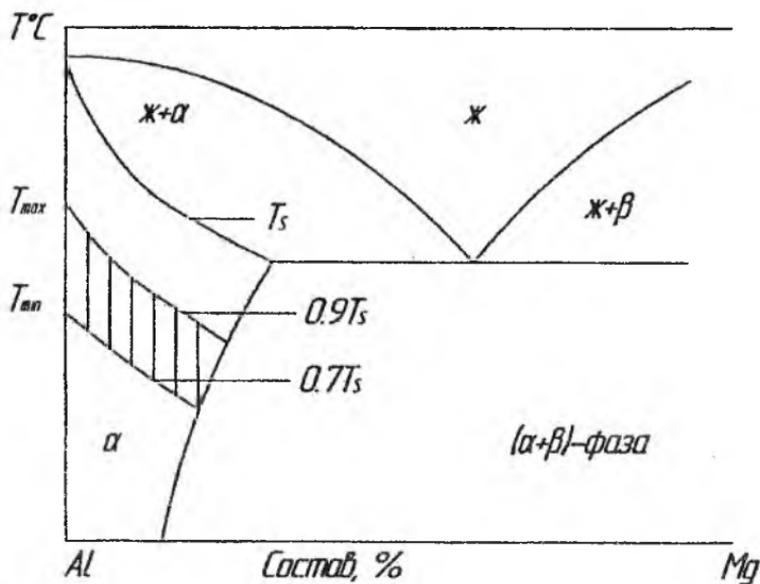
Аналитические методы расчета оптимальной скорости истечения для каждого конкретного изделия с учетом влияния совокупности всех факторов еще не разработаны, и для решения этого вопроса используются данные, полученные многолетней практикой. Чем больше сопротивление деформации прессуемого металла, тем меньше скорость истечения. При прочих равных условиях быстрее прессуются профили простых поперечных сечений, медленнее – сложных поперечных сечений.

Повышению скоростей истечения при прессовании способствуют:

1. Снижение температурного интервала нагрева заготовок перед прессованием.



а



б

Рис. 49. Выбор температуры прессования по диаграммам пластичности (а) и состояния (б)

2. Проведение гомогенизации литых заготовок
3. Применение технологических смазок и покрытий инструмента, снижающих контактное трение,
4. Применение конструкций матриц, обеспечивающих выравнивание скоростей истечения отдельных элементов профилей.
5. Применение местного охлаждения канала матрицы, снижающее температуру выходящего изделия.
6. Обратный метод прессования
7. Градиентный нагрев заготовок.

### 3.5 Структура и свойства профилей

При разработке технологии прессования профилей задача технолога состоит в том, чтобы получить не только заданную форму и геометрические размеры, но и требуемую структуру и механические свойства пресс-изделий.

Структура пресс-изделий характеризуется величиной зерен, их формой и степенью неоднородности. Неоднородность – это различие зерен по величине в продольном и поперечном сечениях. Желательно иметь мелкозернистую структуру по всему объему пресс-изделия, полностью полигонизованную или рекристаллизованную.

Величина зерен зависит от условий прессования металлов. С увеличением степени деформации зерно уменьшается в размере. С увеличением температуры зерно, наоборот, возрастает. Повышение температуры  $T$  значительно сильнее влияет на рост зерен, чем понижение степени деформации  $\epsilon$ , рис. 50.

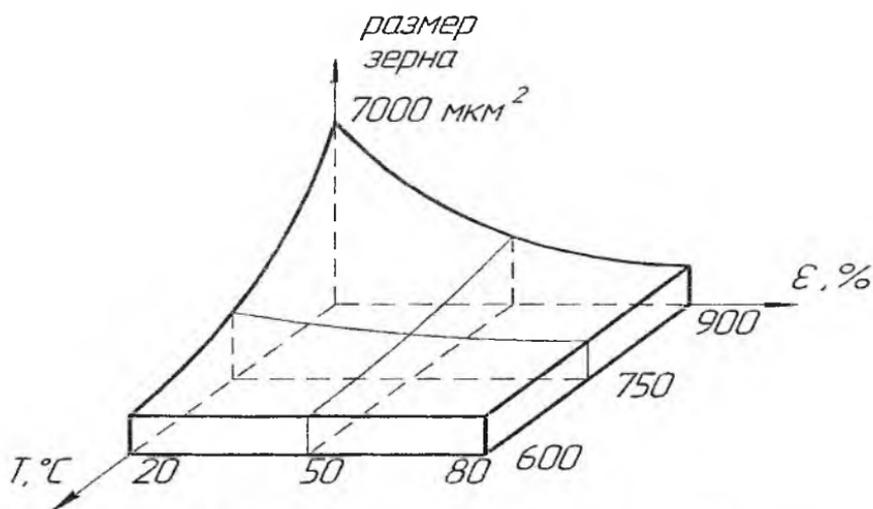
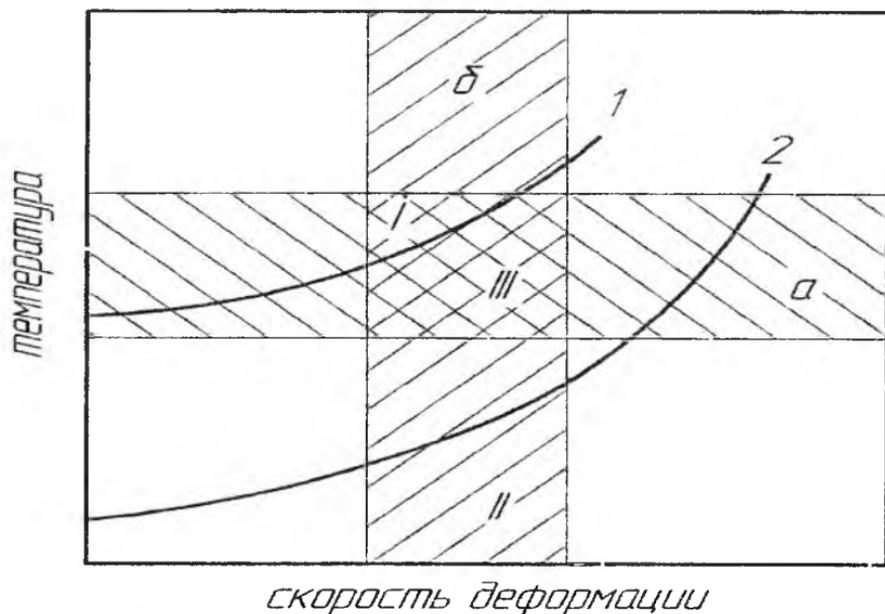


Рис. 50. Диаграмма рекристаллизации для меди

Так как при прессовании температурное поле заготовки неравномерно, а деформации по объему заготовки неодинаковы, то структура пресс-изделий неоднородна. В центральных слоях зерна крупнее и уменьшаются при переходе в периферийные слои. Структура меняется и по длине пресс-изделия — выходящая часть профиля обычно имеет крупнозернистую структуру, ближе к утяжному концу размеры зерен уменьшаются. Формирование структуры и свойств в процессе прессования существенно зависит от равномерности течения металла. Из-за неравномерности течения в одном и том же пресс-изделии возможно образование самых разнообразных зон: с рекристаллизованной и перекристаллизованной структурой, мелким и крупным зерном, слабо и сильно выраженной волокнистостью. Это можно объяснить разным временем протекания упрочняющих (наклепа) и разупрочняющих (возврата и рекристаллизации) процессов.

На формирование структуры существенно влияет скорость деформации, рис. 51. В зависимости от выбранных условий

деформирования можно получить любую структуру: полигонизированную, рекристаллизационную, смешанную.



1 – линия начала рекристаллизации; 2 – линия конца рекристаллизации;  
 а – температурный интервал прессования; б – интервал скоростей деформаций при прессовании; I – полигонизированная структура;  
 II – рекристаллизационная структура; III – смешанная структура

Рис. 51. Диаграмма структурных состояний:

Разновидностью неоднородности структуры является крупнокристаллический ободок. Он образуется в прессовых полуфабрикатах в периферийной зоне при прямом методе прессования алюминиевых сплавов без смазки. Основная причина образования – чрезвычайно большие местные деформации поверхностных слоев пресс-изделия. Чаще всего во время нагрева перед закалкой или под действием повышенной температуры при прессовании и последующем медленном

охлаждении в этих слоях происходит интенсивная собирательная рекристаллизация. Возникновение такого ободка весьма нежелательно вследствие резкого снижения в нем прочностных и усталостных характеристик.

При прессовании прутков в одноканальные матрицы ободок располагается симметрично в виде кольцевой зоны по всему периметру прутка.

Слоистую структуру, часто называют шиферной. Основные причины шиферной структуры: газовая пористость в заготовке, шлаковые и полиметаллические включения, их попадание между слоями металла, прессование профилей из многофазных сплавов при температуре фазовых превращений, когда деформация происходит по объему новых фаз. Шиферная структура в пресс-изделиях нежелательна, так как уменьшаются механические свойства в поперечном направлении.

При неравномерности структуры пресс-изделий механические свойства их также неравномерны. Характеристики прочности металлов  $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$  повышаются от центра изделия к периферии и от переднего конца к заднему. Характеристики пластичности  $\delta$ ,  $\psi$ , наоборот, уменьшаются от центра пресс-изделия к периферии и от переднего конца к заднему. Такая неравномерность механических свойств является существенным недостатком процесса прессования. Неравномерность механических свойств значительно снижается при коэффициентах вытяжки более 10.

При прессовании термически упрочняемых алюминиевых сплавов Д1, Д16, В95, АВ наблюдается пресс-эффект. Он заключается в том, что в продольном направлении изделие обладает повышенной прочностью и пониженной пластичностью по сравнению с прочностью и пластичностью аналогичных изделий, полученных волочением или прокаткой при одинаковых условиях термической обработки. Основная причина повышения прочности заключается в том, что температура

рекристаллизации упрочняемых алюминиевых сплавов, подвергнутых прессованию, больше температуры нагрева под закалку. В этом случае пресс-изделия после окончательной термообработки имеют некристаллизованную структуру, что и обуславливает его повышенную прочность.

### 3.6 Дефекты

Качество пресс-изделий определяется не только точностью размеров, степенью чистоты поверхности, структурой металла, уровнем механических свойств, но и количеством дефектов. Дефектом является любое отклонение от технических условий, ГОСТов, ОСТов, на поставку профиля, выходящие за пределы допуска. Все дефекты можно условно разделить на три группы: геометрические, поверхностные, макро- и микроструктурные, рис. 52.

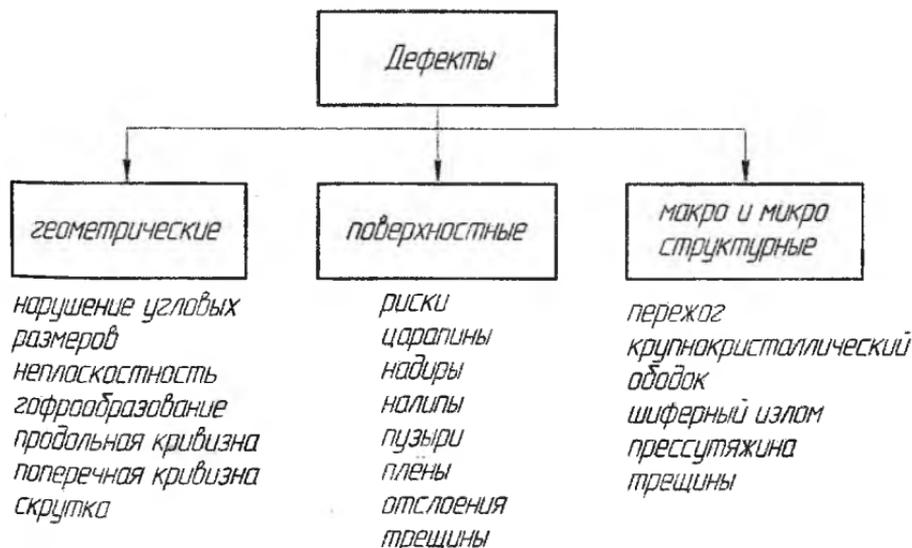
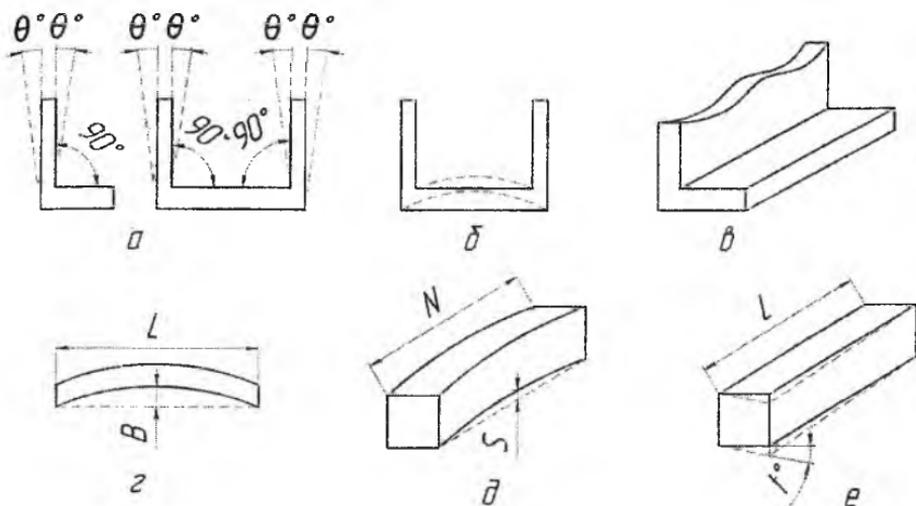


Рис. 52. Классификация дефектов при прессовании

Геометрические дефекты. При определении соответствия геометрических характеристик пресс-изделий требуемым условиям, записанных в ГОСТах, ОСТах и ТУ, проверяют размеры поперечного сечения профиля: толщины различных полок, стенок, величины радиусов, изменения углов между отдельными элементами, неплоскостность, поперечную и продольную скрутку.

Измерение геометрических параметров проводят с помощью микрометра, штангельциркуля, шаблонов.

Типичные нарушения заданных размеров и формы: нарушение угловых размеров (рис. 53а), неплоскостность (рис. 53б), гофрообразование (рис. 53в), продольная кривизна определяется величиной стрелы прогиба между опорными точками профиля при укладке его на контрольную плиту (рис. 53г). Измерение стрелы прогиба  $B$  на длине профиля  $L$  производят в плоскости, перпендикулярной этой плите. Ее величину делят на длину  $L$  и относят к одному метру длины профиля. Допускаемый прогиб 1-1,5 мм/м. Поперечная кривизна (рис. 53д) измеряется величиной прогиба между крайними точками профиля в плоскости, параллельной контрольной плите. Скрутка вокруг продольной оси профиля приведена на рис. 53е.



а – нарушение угловых размеров; б – неплоскостность;

в – гофрообразование; г – продольная кривизна  $B$ , мм;  $L$  – длина профиля;

д – поперечная кривизна  $S$ ,  $N$  – длина профиля, мм; е – скрутка

Рис. 53. Типичные нарушения заданных размеров профиля

На точность геометрических размеров профиля влияют:

- 1) правильность определения размеров канала матрицы при ее проектировании и изготовлении;
- 2) неравномерность скоростей истечения отдельных элементов профиля;
- 3) эксплуатация матрицы (прогиб и износ матрицы);
- 4) соосность контейнера и матрицы.

**Поверхностные дефекты.** Формирование гладкой и чистой поверхности пресс-изделия протекает в особых условиях. Эта поверхность в сотни и тысячи раз превышает поверхность заготовки, т.е. поверхность профиля в значительной степени является вновь образованной – ювенальной. В момент образования поверхность испытывает влияние высоких температур и воздушной атмосферы. Во время нахождения в

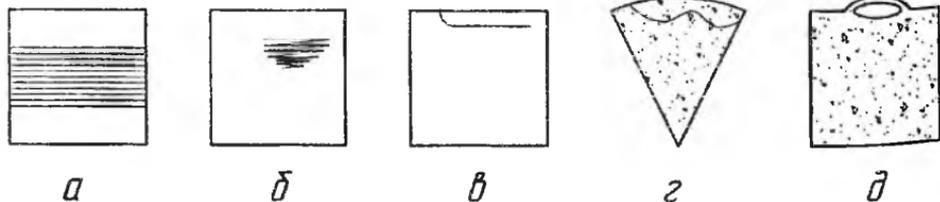
матрице на поверхность действуют силы трения.

Чистая, гладкая поверхность позволяет сократить расходы на ее шлифовку и полировку, там где это требуется, улучшить товарный вид пресс-изделий.

Типичные дефекты поверхности: продольные риски, царапины, надирсы и налипы, плены и отслоения, пузыри и трещины.

Продольные риски появляются вследствие неровностей, забоин, трещин на поверхности рабочего пояска. Одна из причин образования рисков на алюминиевых профилях – это образование окислов алюминия на их поверхности  $Al_2O_3$ . Окислы очень хрупкие и твердые. На калибрующем пояске окислы разрушаются, внедряясь в мягкий алюминий, нанося риски.

Основная причина образования царапин – это движение пресс-изделий по желобу пресса. Надирсы и налипы появляются на поверхности профиля из-за адгезии прессуемого металла к металлу инструмента. Под пленами и отслоениями понимают поверхностные макро- и микронесплошности. Плена – это нарушение сплошности по части контура профиля. Отслоение – это нарушение сплошности по всему периметру, рис. 54. Они появляются из-за загрязнения поверхности заготовки, попадания смазки внутрь заготовки. Пузыри образуются из-за попадания в прессуемый металл частиц смазки, воздуха и наслоений.



а – надир; б – налип; в – плен; г – отслоение; д – пузырь

Рис. 54. Типичные поверхностные дефекты:

Трещины из числа поверхностных дефектов наиболее опасны, так как пресс-изделия с трещинами не поддаются исправлению и являются окончательным браком.

Поверхностные трещины наклонены к оси прессования под определенным углом и направлены к выходному концу пресс-изделия. Они появляются периодически с интервалом  $l$ , начало новой трещины лежит в той же плоскости поперечного сечения, что и конец предыдущей (рис. 55).

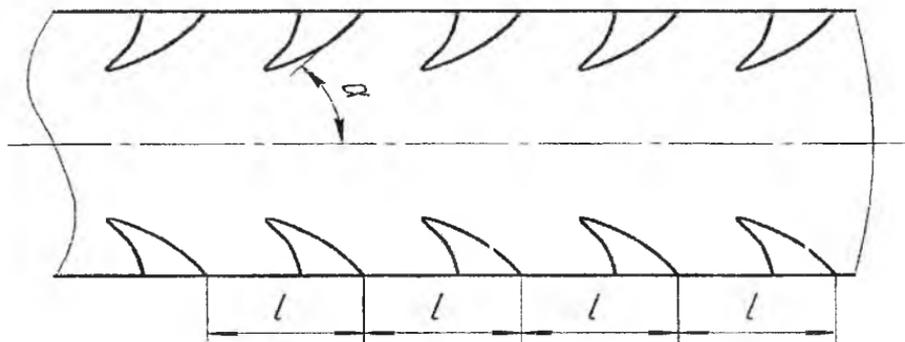


Рис. 55. Трещины типа «ерш»

Причина образования таких трещин состоит в том, что в очаге пластической деформации имеет место слишком большой градиент скоростей истечения различных слоев прессуемого металла. Внутренние слои из канала матрицы вытекают быстро, а поверхностные тормозятся реактивными силами трения. За счет целостности металла все слои истекают с единой средней скоростью. Поэтому в поверхностных слоях на выходе из очага пластической деформации появляются продольные растягивающие напряжения. Если вязкость прессуемого металла недостаточна, а величина продольных напряжений достигнет предела прочности  $\sigma_B$ , то образуется поверхностная поперечная трещина. Так как поверхностные слои тормозятся, а внутренние истекают быстрее, то

трещина развивается вглубь. Форма трещины обусловлена соотношением скорости ее углубления  $v_{тр}$  и скорости истечения металла  $v_{ист.}$ , рис. 56.

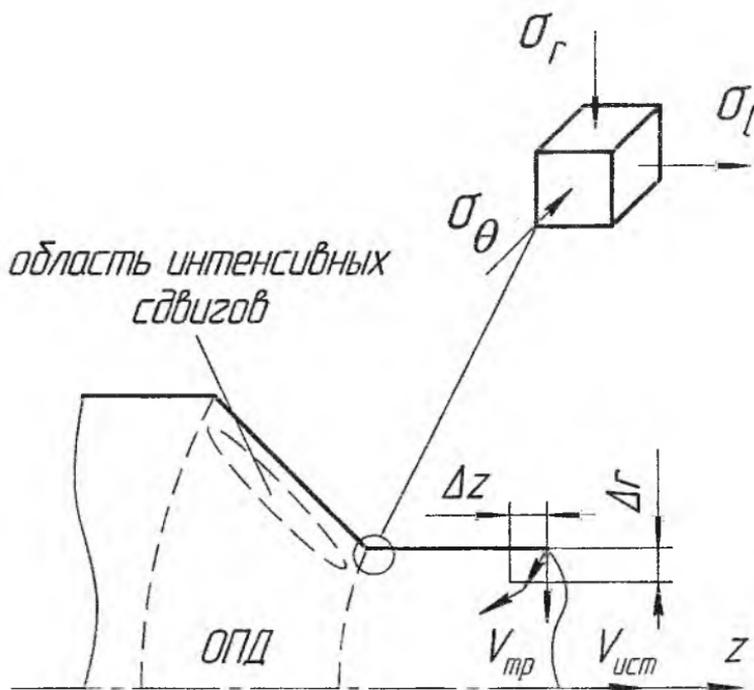


Рис. 56. Схема образования трещины типа «ерш»

В любой момент времени  $\Delta t$  трещина углубляется на  $\Delta r$ , а пресс-изделие перемещается на  $\Delta z$ . При развитии трещины растягивающие напряжения снимаются. Как только трещина затухает, с поверхности изделия в точке А начинает образовываться новая трещина. Поэтому трещины появляются периодически с интервалом  $l$ .

Уменьшить вероятность образования поверхностных трещин можно за счет обеспечения более равномерного истечения металла, соблюдения температурно-скоростных условий, создания противодействия на выходе из канала матрицы.

К макро- и микроструктурным дефектам относят, описанные ранее, пережог, крупнокристаллический ободок, шиферный излом, пресс-утяжина и трещины. Трещины образуются внутри профиля в местах резкого перепада одной части профиля к другой.

### 3.7 Технологическая карта

Работу по проектированию технологии выполняют инженеры-технологи. В их задачу входит разработать технологический процесс производства, спроектировать необходимый инструмент.

Рассмотрим пример прессования профиля алюминиевого сплава Д16. По конфигурации профиль представляет собой тавр, высота стойки которого 60 мм, ширина основания 40 мм, а толщина везде по 2 мм. Заказанная длина профиля 6 м, механические свойства отвечают закаленному, естественно состаренному состоянию.

Определяем размер заготовки. Площадь поперечного сечения профиля равна  $210 \text{ мм}^2$  ( $2,1 \text{ см}^2$ ). Массу 1 м длины профиля рассчитываем по формуле  $m = f_{\text{кр}} l \rho$ , где  $f_{\text{кр}}$  – площадь сечения профиля,  $\text{см}^2$ ;  $l$  – длина его, см (в данном случае  $l=100$  см);  $\rho$  – плотность металла (для сплава Д16  $\rho=2,77 \text{ г/см}^3$ ). Отсюда масса 1 м заданного профиля равна:  $2,1 \times 100 \times 2,77 = 580 \text{ г} = 0,58 \text{ кг}$ .

Определяем объем металла заготовки. Чтобы получить готовый профиль длиной 6 м, нужно иметь отпрессованную заготовку длиной около 6,6 м. Такой припуск, равный 0,6 м, необходим для захватов концов профиля в растяжной машине: концы будут смяты зажимами, а потому отрезаны (примерно по 300 мм с каждой стороны) и удалены в отход. Для получения профиля длиной 6,6 м объем металла заготовки должно быть  $660 \times 2,1 = 1400 \text{ см}^3$ .

Теперь, исходя из наибольшего размера сечения профиля, равного 60 мм, подберем диаметр контейнера, который наиболее подходит к нашему профилю: он равен 95 мм и предназначен для работы на прессе усилием 12 МН.

Нам остается определить длину заготовки, исходя из объема металла  $V = 1400 \text{ см}^3$ . Из школьного курса геометрии известно, что объем

цилиндра, в данном случае круглой заготовки, равен  $V = \frac{\pi D^2}{4} \times L = 1400$ ,

где  $D$  – диаметр;  $L$  – длина. Отсюда  $L = \frac{1400 \times 4}{\pi \times 9,5^2} = 19,8 \text{ см} \approx 200 \text{ мм}$ .

Принимая во внимание, что при прямом прессовании необходимо оставить пресс-остаток длиной 20 % от длины заготовки, определяем окончательные размеры ее, равные: диаметр 95 мм, длина  $200 + 0,2 \times 200 = 240 \text{ мм}$ .

Далее рассчитаем усилие прессования, используя формулу И. Л. Перлина. Расчеты мы здесь приводить не будем, а дадим результат: полное усилие прессования равно 8 МН. Таким образом, усилия предварительно выбранного пресса 12 МН оказывается достаточно для прессования заданного профиля.

Определяем режимы обработки отпрессованного профиля: температуру закалки выбираем в соответствии с технологической инструкцией на закалку 495—500 °С, время выдержки в печи для выравнивания температуры по объему металла при толщине стенки 2 мм 15 мин, закалочная среда — вода.

Правку растяжением планируем на растяжной машине с поворотными головками, так как при прессовании возможна скрутка профиля. Усилие растяжения также рассчитываем: для нашего профиля оно должно быть не менее 55 кН. Следовательно, растяжная машина на 300 кН может править профиль с большим запасом усилия. Обрезку

концов профиля с учетом небольшой толщины стенок планируем проводить на ленточных пилах.

Все запланированные операции цикла обработки записывают в технологическую карту, которая является основным документом, определяющим режимы обработки. В карте также приводится баланс металла. На примере заданного профиля несколько упрощенно он рассчитывается следующим образом.

1. Определим массу заготовки G:

$$G = \left( \frac{\pi D^2}{4} \cdot L \cdot \rho \right) : 1000 = \frac{\pi}{4} \cdot 9,5^2 \cdot 24 \cdot 2,77 : 1000 = 4,7 \text{ кг}.$$

Здесь D – диаметр заготовки, см; L – длина заготовки, см;  $\rho$  – плотность заготовки, г/см<sup>3</sup>.

2. Определяем массу изделия – готового профиля ( $Q_{\text{изд}}$ ):

$$Q_{\text{изд}} = l \cdot m = 0,58 \cdot 6 = 3,6 \text{ кг}.$$

Здесь l – длина готового профиля, м; m – масса 1 м профиля, кг.

3. Определяем массу отходов ( $Q_{\text{отх}}$ ):

$$Q_{\text{отх}} = G - Q_{\text{изд}} = 4,7 - 3,6 = 1,1 \text{ кг}.$$

4. Определяем выход годного:  $(3,6:4,7) \times 100\% = 74\%$ .

5. Баланс металла приводим к 1 т годных профилей. Масса металла заготовок, которую нужно переработать для получения 1 т годных (сдаваемых на склад) профилей, называется запуском. Величина запуска определяется по проценту выхода годного:  $(1000 \text{ кг} \times 100\%) : 74\% = 1350 \text{ кг}$ . Это означает, что при производстве 1 т профилей образуется 350 кг отходов.

В технологической карте приводятся также и некоторые другие экономические показатели производства: затраты работающих на отдельных операциях на 1 т годного с учетом запуска в нормо-часах, затраты времени оборудования в станко-часах, разряды работающих и их число, если операция выполняется бригадой в несколько человек;

заработная плата на операцию. Все эти данные необходимы для того, чтобы определить затраты производства на выпуск - так называемую смету производства, а на ее основе - себестоимость продукции.

### 3.8 Вопросы для самоконтроля

1. Какие показатели характеризуют качество пресс-изделий?
2. Какие бывают виды брака при прессовании?
3. Как назначают оптимальные размеры заготовки при прессовании?
4. Какова общая технологическая схема получения профилей из алюминиевых сплавов?
5. Как рассчитать усилие правки профилей растяжением?
6. Как рассчитать рабочий ход подвижного захвата правильно-растяжной машины?
7. Какие технологические факторы способствуют скручиванию профилей?
8. Какие технологические факторы способствуют искривлению профилей?
9. Почему в подавляющем большинстве случаев алюминиевые сплавы прессуют без смазки?
10. Какие факторы способствуют поверхностному растрескиванию пресс-изделий?
11. Какие факторы способствуют формированию трещин в центральных слоях профилей?
12. Из каких соображений назначают температуру прессования?
13. Из каких соображений назначают скорость прессования?
14. Что такое крупнокристаллический ободок?
15. В чем сущность пресс-эффекта?
16. Какие данные приводятся в технологической карте?

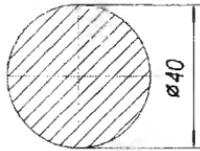
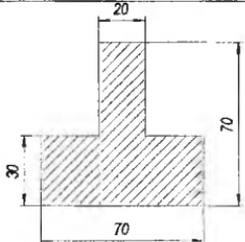
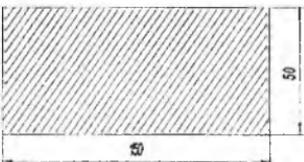
17. Как определяют выход годного?
18. Как уменьшить вероятность образования поверхностных трещин?
19. Что понимают под «пленами» и «отслоениями»?
20. Перечислите типичные нарушения заданных размеров профиля
21. Чем характеризуется структура пресс-изделий?
22. Укажите пути повышения скорости истечения при прессовании
23. Как изготавливают заготовки для прессования?
24. Когда применяют «скальпирование» заготовок?
25. Что дает гомогенизация заготовок?
26. Перечислите наиболее распространенные дефекты заготовок?
27. Из чего складывается температурное поле в прессуемой заготовке?
28. Как изменяются механические свойства металлов по объему профиля?

### 3.9 Задачи

1. Определить относительное увеличение диаметра заготовки из сплава АД31 при нагреве от  $20^\circ$  до температуры  $500^\circ$ . Принять  $\alpha = 25 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ .
2. При постоянном объёме заготовки  $V = \text{const}$  найти отношение  $L/D$ , при котором боковая поверхность заготовки (включая и площади торцов) будет минимальной.
3. Даны следующие размеры заготовок:  $L/D=2$ ,  $L/D=3$ ,  $L/D=4$ . Принимая диаметр заготовки постоянным и равным 100 мм, выбрать оптимальное соотношение  $L/D$ , если сумма всех отходов составляет 16 см $^3$ .
4. Определить размеры заготовки для прямого прессования сплошных профилей в одноканальные матрицы по данным табл. 8.

5. Показать, при каком методе (прямом или обратном) при одинаковых режимах прессования выход годного будет наибольшим.

Табл. 8. Исходные данные

| № варианта | Поперечное сечение профиля  | $D_k$ , мм | $l_{пр}$ , мм | $L_{ст.пресса}$ , м |
|------------|---|------------|---------------|---------------------|
| 1          |  | 200        | 1500          | 15                  |
| 2          |  | 150        | 2000          | 17                  |
| 3          |  | 300        | 3000          | 12                  |

6. Определить выход годного при прямом прессовании круглого профиля диаметром 60 мм, если  $\lambda = 20$ , сдаваемая длина кратна 2000 мм, длина стола пресса равна 15 м.

7. На горизонтальном гидравлическом прессе усилием 30 МН применяют контейнеры следующих диаметров: 225 мм, 250 мм, 270 мм. Требуется выбрать оптимальный диаметр контейнера для прессования прутка диаметром 75 мм и длиной 6000 мм.

8. Определить количество профилей, получаемых без учёта отходов при прессовании заготовки с размерами  $D=150$  мм,  $L=450$  мм, если

поперечное сечение профиля представляет собой равносторонний треугольник со стороной 50 мм, а сдаваемая длина кратна 3000 мм.

9. Рассчитать число каналов в матрице для прессования прутков диаметром 10 мм с коэффициентом вытяжки  $\lambda = 22,5$  из заготовки диаметром 150 мм без учёта отходов.

10. Определить размеры и массу заготовки без учёта отходов, если нужно получить профиль с поперечным сечением в форме квадрата со стороной 40 мм и длиной 15 м. В расчётах принять коэффициент вытяжки  $\lambda = 25$ ,  $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$ .

11. Найти длину заготовки для прессования прутка диаметром 20 мм и длиной 7500 мм из контейнера диаметром 100 мм. В расчётах отходами пренебречь.

## 4 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕССОВОГО ИНСТРУМЕНТА

### 4.1 Состав прессового инструмента

В состав прессового инструмента (инструментальной наладки) обычно входят: матрица, контейнер, пресс-штемпель, пресс-шайба, подкладка под матрицу, матрицедержатель. При прессовании труб используется игла.

На рис. 57. представлена типовая инструментальная наладка для прессования профилей сплошного поперечного сечения с прямым истечением. Матрицу 6 и подкладку под матрицу 7 устанавливают в матрицедержатель 5. Фиксацию матрицы с подкладкой осуществляют с помощью штифта, запрессованного в торец матрицы, обращенной к подкладке. Такое соединение обеспечивает точное совпадение канала матрицы и профилированного отверстия в подкладке, которая служит опорой для матрицы.

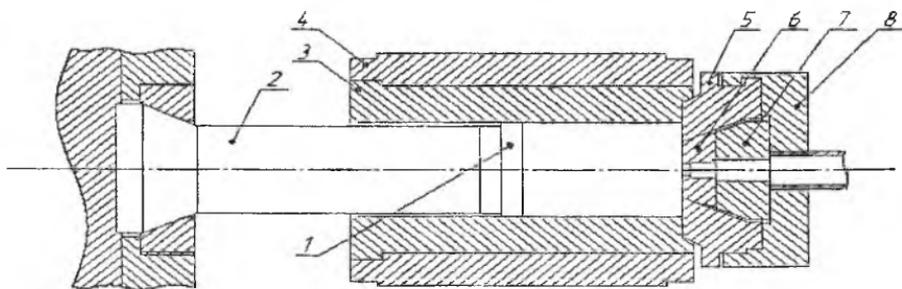


Рис. 57. Типовая инструментальная накладка для прессования профилей с прямым истечением

Собранный таким образом матричный комплект (матрица, подкладка, матрицедержатель) устанавливается неподвижно в специальную U-образную опору – мундштук 5, расположенную в передней

поперечине пресса, и фиксируется в нем.

Пресс-штемпель 2 передает давление пресса на заготовку. Для предохранения торца пресс-штемпеля от контакта с нагретой заготовкой используют сменные диски – пресс-шайбы 1, как правило, не скрепленные с пресс-штемпелем. Пресс-штемпель изготавливают несколько меньше диаметра втулки 3 контейнера 4. Крепление пресс-штемпеля на гидропрессе осуществляется с помощью различных соединений.

В непосредственном контакте с прессуемым металлом в процессе выдавливания находятся матрица, внутренняя втулка контейнера 3 (который может иметь несколько концентрических втулок 4) и пресс-шайба. Все они испытывают значительные силовые циклические нагрузки.

## 4.2 Матрица

Матрица является наиболее важным технологическим инструментом, в котором совершается формирование внешней формы, точности размеров и качества поверхности пресс-изделия (профиля).

Матрица на рис. 58, представляет собой металлический диск с прорезанным в нем каналом по форме пресс-изделия. Ее устанавливают в передней части контейнера, она замыкает его полость с заложенной заготовкой.

Основные элементы конструкции матрицы: обжимная часть (зеркало) 1, рабочий канал 2 с калибрующим пояском 3, выходная часть 4, посадочная 5 и опорная 6 поверхности, рис.2. Выходная часть 4 матрицы устраняет возможность задиранья деформируемого профиля кромкой канала 2.

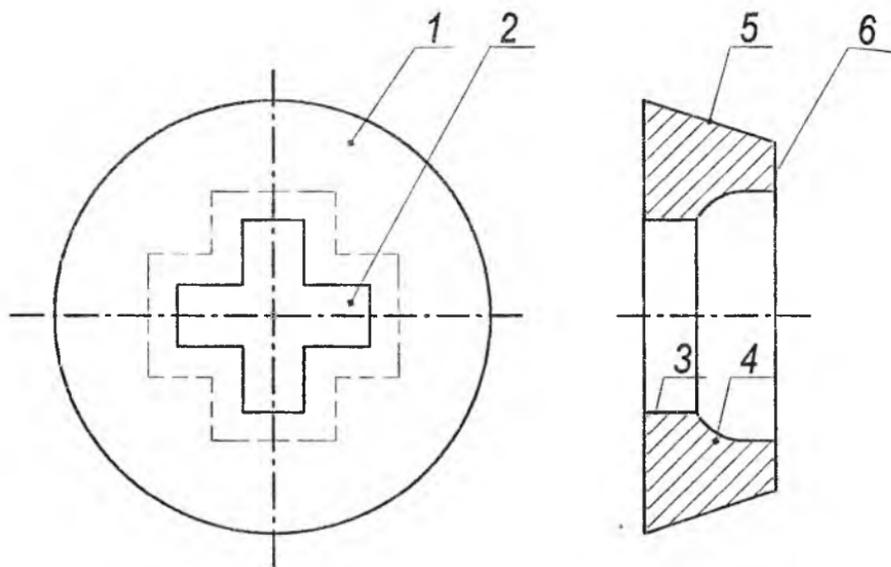


Рис. 58. Основные элементы конструкции матрицы

По форме обжимной (заходной) части матрицы разделяют на плоские (рис. 59а), конические (рис. 59б), плоскоконические (рис. 59г), сигмоидальные (рис. 59д).

При прессовании профилей из алюминиевых сплавов чаще всего используют плоские матрицы (рис. 59а). В плоской матрице поверхность, контактирующая с передним торцом заготовки, называют зеркалом. В ходе прессования на плоских матрицах образуется значительная «мертвая» зона, которая препятствует проникновению различных дефектов в профиль и обеспечивает получение высококачественной поверхности профиля. Одна и та же плоская матрица позволяет проводить прессование из контейнеров различного диаметра. Плоские матрицы просты в изготовлении и обеспечивают легкое отделение пресс-остатка от матрицы. При одинаковых габаритах через плоские матрицы можно прессовать профили большего сечения и в большое число каналов.

Конические матрицы имеют заходную часть в виде конусной воронки, выполненной под углом  $\alpha$  к оси прессования, рис. 59б. Как показывает практика, они обеспечивают более равномерное течение металла на выходе из очага пластической деформации, что снижает усилие прессования. При прессовании через конические матрицы объем «мертвой» зоны значительно уменьшается и она не задерживает продвижение через матрицу в пресс-изделие различных загрязнений с поверхности заготовки. Конические матрицы сложнее в изготовлении, чем плоские. Чаще всего их используют для прессования труб, профилей из труднодеформируемых металлов и сплавов.

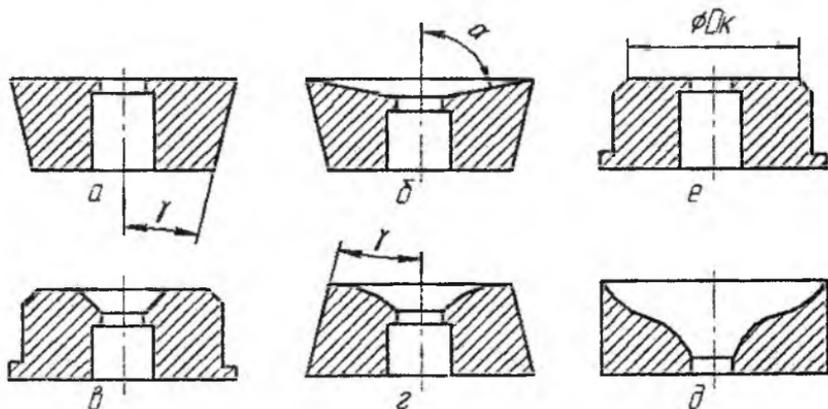


Рис. 59. Конструкции матриц по форме обжимной части и посадочной поверхности:

плоские (а), конические (б), плоскоконические (в),  
радиальные (г), сигмоидальные (д)

Плоско-конические матрицы содержат элементы плоских и конических матриц, рис. 59в. Они используются для прессования труднодеформируемых металлов и сплавов.

Вогнуто-выпуклый контур обжимной зоны сигмовидной матрицы

повторяет границу «мертвой» зоны, рис. 59д. Такие матрицы применяются для прессования профилей со смазкой.

Радиальные матрицы с выпуклой или вогнутой образующей в практике прессования используются для улучшения качества изделий, рис. 59г.

По форме посадочной поверхности в матрицедержателе матрицы разделяют на матрицы с прямым конусом (рис. 59а), обратным конусом (рис. 59г) и цилиндрические с буртом (рис. 59в). Наибольшее распространение получили матрицы с обратным конусом. Посадка матрицы в матрицедержатель с обратным конусом  $\gamma = 3-10^\circ$  обеспечивает плотное соединение матрицы с подкладкой и увеличивает опорную поверхность матрицы. Облегчается сборка и разборка инструмента в матричном узле.

Матрицы с обратным конусом используют для прессования профилей компактных поперечных сечений, с прямым конусом – профилей сложных поперечных сечений, с буртом – профилей несложных поперечных сечений. Для сопряжения контейнера с матрицей в ряде случаев на посадочной поверхности матрицы выполняют конус, рис. 59е.

По числу каналов матрицы разделяют на одно и многоканальные, рис. 60. Одноканальные матрицы чаще всего применяют для прессования профилей сложной конфигурации и крупных сечений, многоканальные матрицы – для прессования профилей более простых форм и небольших сечений. Использование многоканального прессования часто позволяет интенсифицировать процесс прессования и снизить неравномерность истечения.

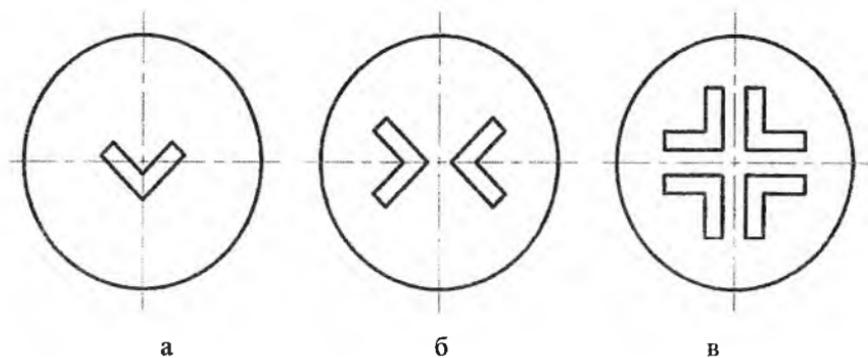


Рис. 60. Конструкции матриц с различным числом каналов  
 а – одноканальные, б – двухканальные, в – четырехканальные

По технологии изготовления матрицы разделяют на монолитные, сборные и разъемные рис. 61.

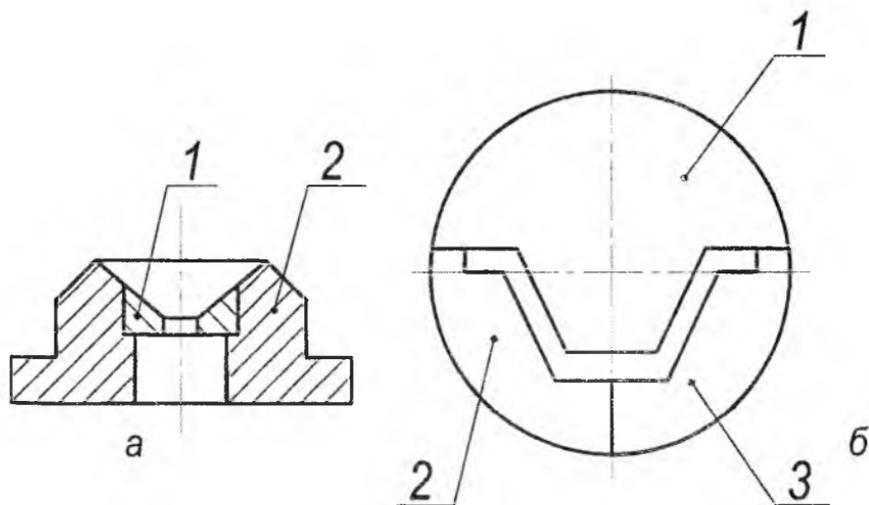


Рис. 61. Конструкции сборных и разъемных матриц:  
 а – сборная, б – разъемная

Сборные матрицы для увеличения стойкости инструмента изготавливают из разных материалов, рис. 61а. Вставку 1 делают их высоколегированных металлокерамических материалов, обладающих повышенной жаропрочностью и износостойкостью. Вставки устанавливают в обойму 2 горячей посадкой. Такие матрицы иногда называют бандажированными. Их используют для прессования профилей из труднодеформируемых сплавов при высоких температурах 1600 – 1700 °С.

Разъемные матрицы состоят из нескольких частей 1,2,3, рис. 61б. Их используют для прессования ступенчатых профилей с законцовками. Они позволяют облегчить удаление отпрессованного профиля с пресс-остатком вне пресса.

По контуру канала матрицы выполняют калибрующие (рабочие) пояски следующих (относительно оси прессования) видов: сходящиеся, расходящиеся и параллельные, рис. 62. Основная функция поясков – управлять течением прессуемого металла на выходе из канала матрицы.

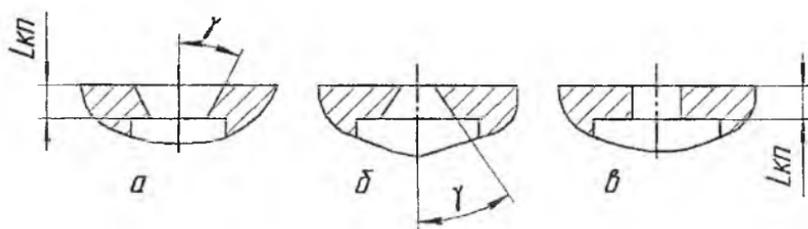


Рис. 62. Конструкции поясков канала матрицы:

а – сходящиеся, б – расходящиеся, в – параллельные.

В расходящемся канале (рис. 62б) длина пояска равна нулю, поэтому профиль имеет минимальную площадь контакта с пояском. Сопротивление истечению и разогрев поверхности профиля меньше, чем в сходящемся

канале (рис. 62а). Основной недостаток расходящегося канала – опасность возникновения на поверхности профиля дефектов в виде налипов и царапин. Частицы прессуемого металла и окислов скапливаются в клиновом зазоре и царапают поверхность профиля, либо привариваются к ней. Другой недостаток таких каналов – быстрый износ острой кромки, что приводит к изменению заданных размеров поперечного сечения прессуемого профиля.

В сходящемся в направлении истечения канале прессуемый металл соприкасается с пояском по всей длине, что вызывает торможение металла за счет увеличения сопротивления истечению. Это приводит к росту температуры поверхности вследствие трения, рис. 62а, поэтому приходится уменьшать скорость истечения металла во избежание образования поверхностных трещин. Качество поверхности профиля выше в сходящемся канале, чем в расходящемся.

Каналы с параллельными цилиндрическими поясками применяются наиболее часто, так как просты в изготовлении, рис. 62в. Путем изменения длины пояска можно регулировать скорость истечения отдельных элементов профиля.

К технологическим элементам конструкции матрицы относятся:

1. Формы и размеры сечения канала матрицы, которые должны учитывать упругие, деформационные и температурные изменения его в процессе прессования, упругую деформационную и термическую усадку прессуемого профиля и внеконтактную пластическую деформацию металла, связанную с неравномерностью истечения отдельных элементов профиля.

2. Форма и длина калибрующих поясков канала матрицы, позволяющие менять сопротивление истечению отдельных элементов профиля.

3. Размещение профиля на зеркале матрицы относительно оси прессования, влияющее на условия прессования и равномерность истечения металла. При равномерном истечении металла профиль получается прямым, без изгибов и скручивания.

4. Расстояние между каналами многоканальных матриц и их расположение относительно оси прессования, оказывающее влияние на стабильность геометрических размеров и степень неравномерности скорости истечения.

5. Толщина матрицы, оказывающая большое влияние на деформацию изгиба ее отдельных элементов, что существенно изменяет размеры прессуемых изделий и снижает стойкость при производстве профилей с полузамкнутыми полостями (особенно у матриц консольного типа).

Большую часть профилей, получаемых прессованием, составляют профили некруглых поперечных сечений. Их прессуют из цилиндрической заготовки. Нарушение геометрического подобия между поперечными сечениями заготовки и прессуемого профиля, наличие реактивных сил трения между заготовкой и контейнером приводит к неравномерному истечению различных участков некруглого профиля.

Из рис. 63. видно, что относительные скорости истечения в каналы равного диаметра, лежащие на разных расстояниях от центра матрицы различны. Каналы, расположенные около оси прессования, имеют большую скорость истечения, чем каналы, расположенные около контейнера. Основная причина такой неравномерности скоростей истечения – реактивные силы трения между заготовкой и контейнером, тормозящие движению периферийных слоев заготовки. Из рис. 64. видно, что относительная скорость истечения из равноудаленных каналов от центра матрицы возрастает с увеличением площади сечения канала.

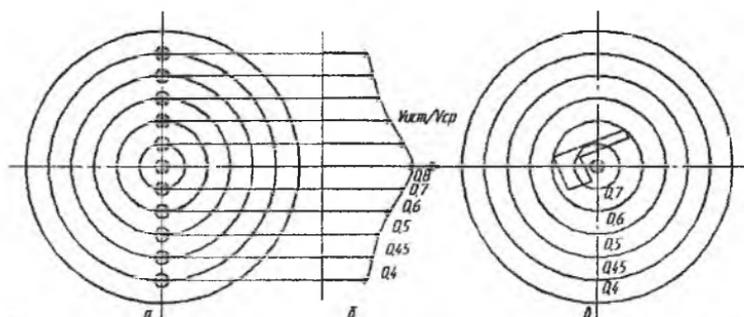


Рис. 63. Распределение относительных скоростей истечения при прессовании в многоканальную матрицу:  
 а – многоканальная матрица, б – поле скоростей,  
 в – семейство линий равных скоростей.

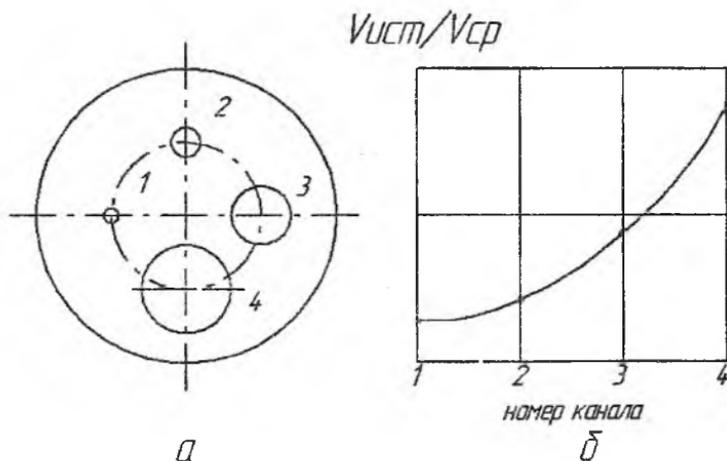


Рис. 64. Распределение относительных скоростей истечения при прессовании в многоканальную матрицу,  
 а – многоканальная матрица, б – поле скоростей

Если сечение профиля разбить на участки равной ширины, то более «массивные» участки и участки, расположенные около оси прессования имеют большую скорость истечения. Поэтому канал на зеркале матрицы необходимо расположить так, чтобы тонкие участки профиля размещались

ближе к центру матрицы, а «массивные» участки дальше от центра матрицы.

Исходя из сложности конфигурации и площади поперечного сечения профиля задаются количеством каналов в матрице. Каналы стремятся располагать симметрично относительно осей. Если матрица одноканальная, то канал не зеркале матрицы располагают следующим образом:

1. При наличии двух осей симметрии профиля центр тяжести его совмещают с геометрическим центром матрицы.

2. При одной оси симметрии и толщине полок профиля, незначительно отличающихся друг от друга, центр тяжести также совмещают с геометрическим центром матрицы.

3. Асимметричные профили и профили с одной осью симметрии, но со значительной разницей в симметрии полок, располагают таким образом, чтобы тонкие элементы были максимально приближены к центру матрицы.

Примеры расположения каналов на зеркале матрицы приведены на рис. 65.

Выравнивание скоростей истечения может быть достигнуто прессованием в многоканальные матрицы. В этом случае расположение поперечных сечений прессуемых профилей становится близким к осесимметричному.

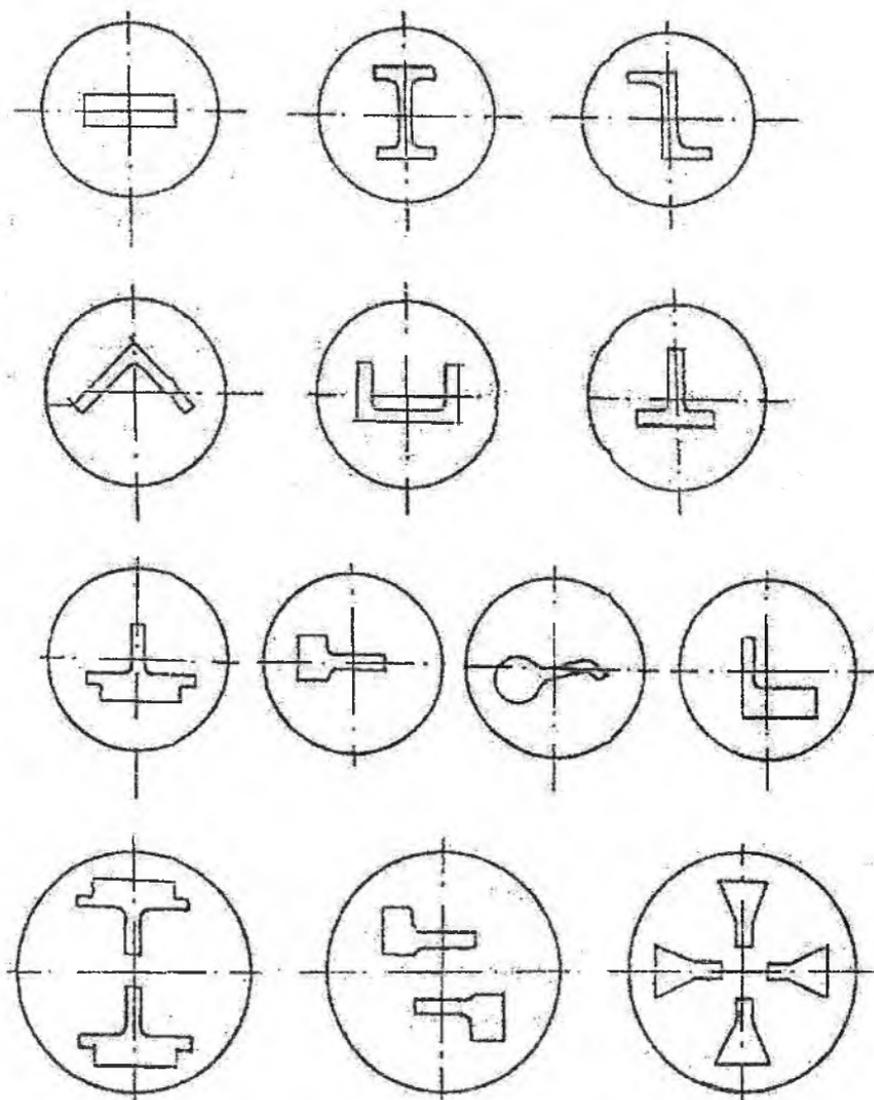


Рис. 65. Варианты рационального расположения каналов на зеркале матрицы

Для рационального положения канала для прессования несимметричного профиля на зеркале матрицы можно использовать линии

равных скоростей (рис. 63в). В каждом кольце относительную истечению скорость считаем одинаковой. На полученную сетку накладываем поперечное сечение профиля в натуральную величину. Перемещая профиль по зеркалу матрицы, можно добиться такого положения, в котором разность скоростей истечения в крайних точках сечения достигнет минимальных значений. Это положение профиля и будет рациональным. В настоящее время эту задачу выполняют компьютеры.

За счет расположения канала на зеркале матрицы не всегда удастся добиться одинаковой скорости истечения во всех точках поперечного сечения профиля. Поэтому найдя рациональной положение канала, регулируют скорость истечения, изменяя длину калибрующего пояска и угол наклона его образующих.

Рассмотрим уравнение равновесия элементарного слоя единичной длины в области калибрующего пояска с параллельными образующими, рис. 66.

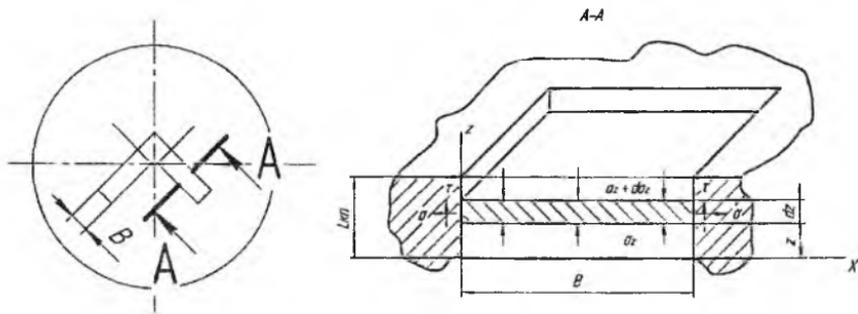


Рис. 66. Схема очага деформации при движении пресуемого металла в канале матрицы.

При составлении уравнения принимаем гипотезу плоских сечений и постоянство напряжений трения по поверхности калибрующего пояска по

закону Зибеля:

$$\tau = \mu_{к.п.} \cdot S_{д.к.},$$

Где  $\mu_{к.п.}$  - коэффициент трения в канале матрицы;

$S_{д.к.}$  - сопротивление деформации прессуемого металла на выходе из канала матрицы.

Проектируя все силы, действующие на элементарный слой единичной длины, на ось  $Z$ , получим:

$$\sigma_z B - (\sigma_z + d\sigma_z) B + 2\mu_{к.п.} S_{д.к.} dZ = 0$$

откуда

$$d\sigma_z = 2\mu_{к.п.} S_{д.к.} dZ / B$$

После интегрирования имеем:

$$\sigma_z = 2\mu_{к.п.} S_{д.к.} Z / B + C$$

Постоянную интегрирования  $C$  находим из граничного условия на выходе из канала матрицы. При  $Z = 0$ ,  $\sigma_z = 0$ . Откуда  $C = 0$ .

Напряжение  $\sigma_z$  достигает максимального значения при  $Z = l_{к.п.}$ , т.е. на уровне зеркала матрицы. Следовательно:

$$\sigma_z = 2\mu_{к.п.} S_{д.к.} l_{к.п.} / B$$

Из формулы видно, что чем больше длина калибрующего пояска  $l_{к.п.}$  и тоньше стенка элемента профиля  $B$ , тем больше сопротивление истечению для движения прессуемого металла в канале матрицы.

Таким образом, калибрующий поясок выполняет не только функцию повышения точности геометрии наружного контура прессуемого профиля, но и выравнивания скоростей истечения отдельных элементов поперечного сечения профиля. При малой длине пояска облегчается истечение металла из канала матрицы, при большой длине – затрудняется.

Для нахождения требуемой длины калибрующего пояска по предложению Б.И. Матвеева и Е.Б. Журавского поперечное сечение канала разделяют на несколько элементов равной ширины, чаще всего

прямоугольной формы или близкой к ней, рис. 67. При одинаковых скоростях истечения длины калибрующих поясков различных элементов  $i$  и  $j$ , должны быть обратно пропорциональны их удельным параметрам:

$$\frac{\ell_j}{\ell_i} = \frac{\Pi_i \cdot F_j}{F_i \cdot \Pi_j}, \quad (9)$$

где  $\Pi_i$  и  $\Pi_j$  – периметры элементов  $i$  и  $j$ ;

$F_i$  и  $F_j$  – площади элементов  $i$  и  $j$ ;

$l_i$  и  $l_j$  – длины калибрующих поясков  $i$  и  $j$ .

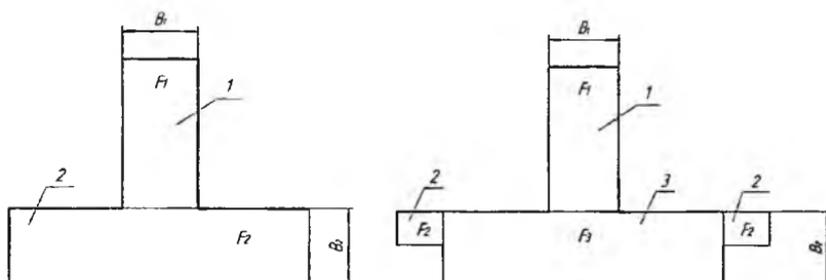


Рис. 67. Примеры разбиения поперечного сечения канала на элементы равной ширины

Задаваясь минимальной длиной пояска для элемента с наибольшим удельным периметром из условия прочности не менее 3 – 5 мм, по формуле (9) нетрудно найти длины поясков для остальных элементов.

Значительное увеличение длины пояска не всегда эффективно для выравнивания скоростей истечения, так как отпрессованный профиль в канале матрицы перестает соприкасаться с поверхностью калибрующего пояска. Это происходит в результате остывания готового профиля. На практике установлено, что длина калибрующего пояска более толщины прорези не всегда эффективна.

Дополнительное выравнивание скоростей истечения по поперечному

сечению прессуемого профиля достигается путем применения сходящихся калибрующих поясков, рис. 68.

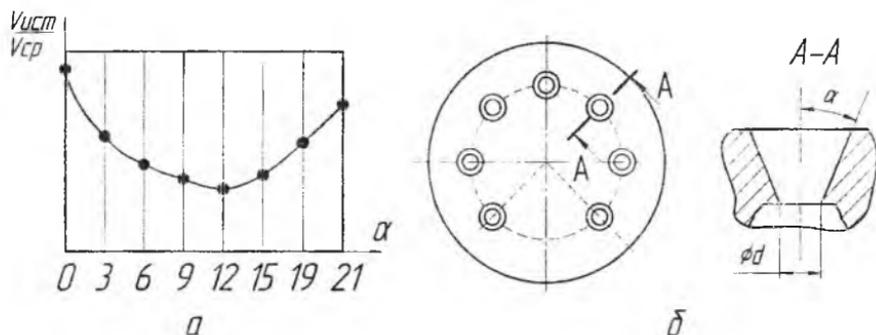
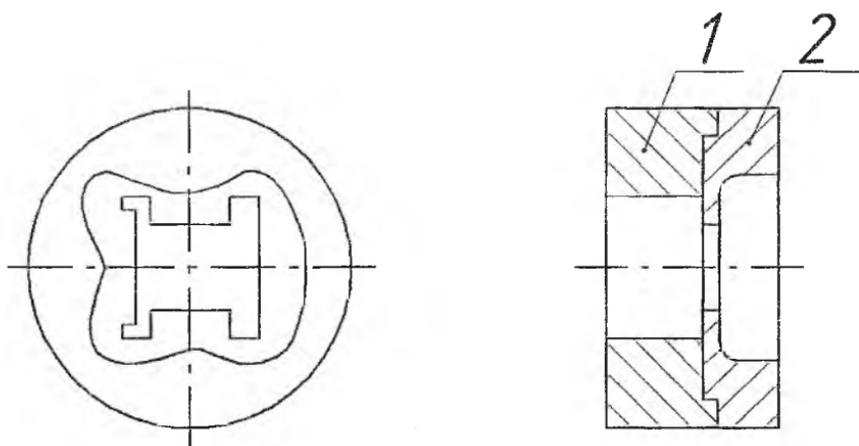


Рис. 68. Распределение относительных скоростей истечения круглых профилей (а) в многоканальную матрицу (б)

Рассмотрим результаты прессования круглых профилей одного диаметра  $d$  в многоканальную матрицу на рис. 68. Все каналы равноудалены от оси прессования. Изменяется только угол наклона пояска  $\alpha$ . Из рис. 68. видно, что сходящиеся пояски с  $\alpha$  до  $12^\circ$  оказывают торможение, уменьшается скорость, а при  $\alpha > 12^\circ$  наоборот, увеличивается скорость истечения. Это связано с увеличением объема металла, питающего профиль.

Одним их эффективных способов выравнивания скоростей истечения отдельных элементов профиля является применение форкамер, поперечное сечение которых подобно поперечному сечению прессуемого профиля, рис. 69.

Изложенная методика позволяет спроектировать матрицу только в первом приближении для простых профилей. Для сложных профилей и многоканальных матриц расчет усложняется и часто окончательная доводка канала матрицы производится при прессовании опытных партий.



1 – форкамера, 2 – матрица

Рис. 69. Конструкция форкамерной матрицы

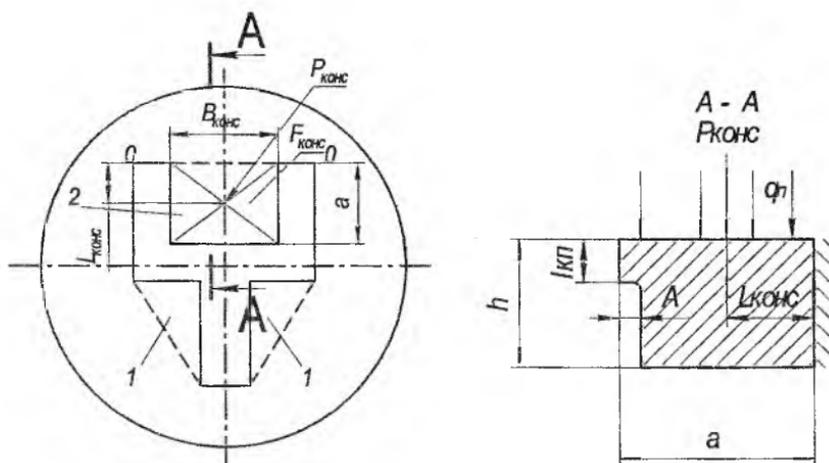


Рис. 70. К расчету консольных участков матрицы

При расчете матриц на прочность следует обратить особое внимание на ее консольные части (участки 1,2 на рис. 70.), выступающие в канале

матрицы, упругий прогиб которых вызывает изменение толщины профиля и исключает тормозное влияние пояска.

Расчет консольных участков матрицы на изгиб проводят как для консольно закрепленной балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой, по формуле:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{M_{\text{изг}}}{W_{\text{изг}}} \leq [\sigma]_{\text{изг}},$$

где  $\sigma_{\text{изг}}$  - напряжение изгиба;

$M_{\text{изг}}$  - изгибающий момент;

$$M_{\text{изг}} = P_{\text{конс}} L_{\text{конс}}$$

$L_{\text{конс}}$  - расстояние от основания консоли до центра приложения равнодействующей силы  $P_{\text{конс}}$ , совпадающей с центром тяжести консольного участка в плане,

$$P_{\text{конс}} = q_{\text{п}} \cdot F_{\text{конс}};$$

$q_{\text{п}}$  - удельное давление в контейнере при максимальном усилии прессы;

$F_{\text{конс}}$  - площадь прямоугольного консольного участка 2,

$$F_{\text{конс}} = B_{\text{конс}} \cdot a;$$

$W_{\text{изг}}$  - момент сопротивления изгибу прямоугольного сечения матрицы,

$$W_{\text{изг}} = \frac{b_{\text{конс}} \cdot h^2}{6}$$

$B_{\text{конс}}$  - ширина консольного участка матрицы у основания консоли;

$h$  - высота матрицы;

$[\sigma]_{\text{изг}}$  - допускаемое напряжение на изгиб материала матрицы;

$[\sigma]_{\text{изг}} = 0,7 \sigma_{\text{в}}$ .

Обычно высоту матрицы назначают из конструктивных соображений,

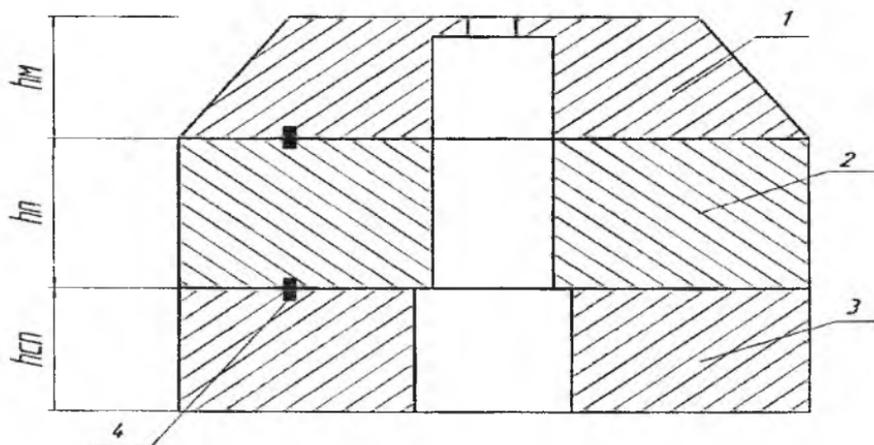
$$h = (0,3 - 0,5) D_k,$$

а затем проводят проверочный расчет.

Для повышения жесткости таких матриц используют подкладки и спецподкладки, рис. 71. В этом случае расчет на прочность консольных участков следует проводить с учетом толщины всего матричного комплекта

$$W_{изг} = \frac{bh_M^2}{6} + \frac{bh_{II}^2}{6} + \frac{bh_{СП}^2}{6}$$

Важное значение для прочности пояска матрицы имеет величина консоли А, рис. 70. Она должна быть минимальной  $A = 0,5 - 2$  мм. Величину а можно рассчитать по рассмотренной выше методике, рассматривая поясок как консольный элемент.



1 – матрица, 2 – подкладка, 3 – спецподкладка, 4 – штифт.

Рис. 71. Матричный комплект

Определение исполнительных размеров канала матрицы  $A_i$  производится с учетом номинальных размеров сечения профиля  $A_n$ , плюсовых допусков на эти размеры  $M$ , материала матрицы и условий

правки по формуле:

$$A_i = A_H + M + (K_Y + K_P + K_T) A_H \quad ,$$

где  $K_Y$  - коэффициент утягивания размера сечения при прессовании (для профилей, имеющих удлиненные участки: «уголок», «швеллер» и т.д.;

$K_P$  - коэффициент уменьшения размера при правке растяжением (табл. 9);

$K_T$  - коэффициент температурной усадки профиля,

$$K_T = T_{\text{заг}} \alpha_{\text{заг}} - T_{\text{матр}} \alpha_{\text{матр}} \quad ,$$

где  $T_{\text{заг}}$  и  $T_{\text{матр}}$  - температуры нагрева заготовки и матрицы, при этом

$$T_{\text{заг}} - T_{\text{матр}} = 30 - 50^\circ\text{C};$$

$\alpha_{\text{заг}}$  и  $\alpha_{\text{матр}}$  - коэффициенты линейного расширения прессуемого металла (для алюминиевых сплавов  $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ) и материала матрицы (для сталей  $\alpha_1 = 14 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ).

Табл. 9. Значения коэффициентов  $K_Y$  и  $K_P$

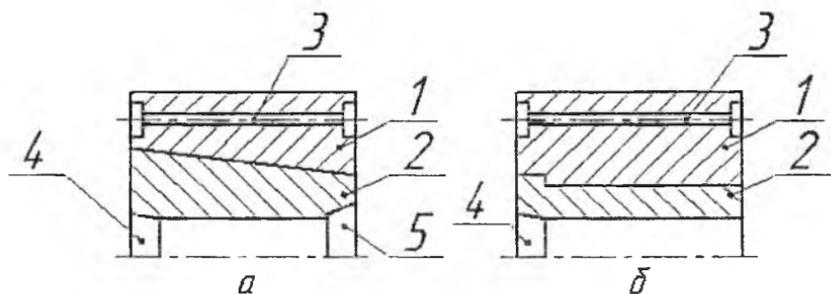
| Размеры элемента профиля, мм | $K_Y$  | $K_P$ |
|------------------------------|--------|-------|
| 1 – 3                        | 0,020  | 0,020 |
| 4 – 20                       | 0,010  | 0,010 |
| 21 – 40                      | 0,0065 | 0,008 |
| 41 – 60                      | 0,0055 | 0,008 |
| 61 – 80                      | 0,004  | 0,006 |
| 81 – 120                     | 0,0035 | 0,005 |
| 121 – 200                    | 0,0025 | 0,004 |

Допуски на размеры составляют приблизительно: для линейных размеров до 10 мм – 1,0%, для линейных размеров выше 10 мм – 0,8%. Расчетные размеры канала матрицы округляют с точностью до 0,1 мм. Более точно допуски на размеры берут из ГОСТа 8617-81 «Профили, прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов».

### 4.3 Контейнер

Контейнер представляет собой стальной полый цилиндр. Он служит приемником цилиндрической заготовки, нагретой до температуры прессования. Во время прессования контейнер воспринимает все давление, необходимое деформации заготовки и получения изделия заданного профиля. При горячем прессовании давление в радиальном направлении на стенки контейнера достигает 1200 МПа. По габаритам контейнер – самая крупная деталь инструментальной наладки.

Основной тип контейнеров – это конструкция из двух и более слоев (втулок), рис. 72. Втулки контейнера запрессовываются одна в другую с натягом, равным  $\Delta = (0,2 - 0,7)\%$  от радиуса втулки. Натяг уменьшается от внутренней втулки к наружной и создается как горячей насадкой, так и применением конусности. В связи с этим втулки выполняют либо конусными (рис. 72а.), либо цилиндрическими (рис. 72б).



1, 2 – втулки; 3 – отверстия для нагревателей, 4 – заходной конус для заготовки; 5 – гнездо для матрицедержателя с матрицей

Рис. 72. Конструкция контейнера

При сборке конической втулки ее устанавливают малым диаметром к матрице, что создает благоприятное нагружение внутренней (рабочей) втулки. В наружной втулке располагают электронагревательные элементы (тэны) для предварительного нагрева контейнера. Со стороны ввода заготовки на рабочей втулке выполнен заходной конус. Чтобы исключить осевое перемещение на втулках изготавливают бурт (рис. 72б).

Рассмотрим однослойный контейнер с равномерным внутренним давлением  $P_B$ , рис. 73.

Во всех внутренних точках контейнера радиальные напряжения  $\sigma_r$  всюду сжимающие, а окружные напряжения  $\sigma_\theta$  – растягивающие. Причем  $|\sigma_\theta| > |\sigma_r|$ . Напряжения по толщине стенки распределены неравномерно и достигают наибольших значений на внутренней поверхности. При  $r = R_B$ ,  $\sigma_r = -P_B$ .

$$\sigma_\theta = P_B \frac{1 + \kappa^2}{1 - \kappa^2},$$

где  $k = R_B / R_H$

Из рис. 73. видно, что при  $R_H \geq 4 R_B$  ( $k < 0,25 - 0,3$ ) наступает момент, когда при неизменном внутреннем давлении  $\sigma_\theta$  уменьшается незначительно и приближается к  $P_B$ . Поэтому дальнейшее увеличение толщины стенки однослойного контейнера не дает существенного увеличения прочности.

С точки зрения эксплуатации наиболее опасные точки расположены на внутренней поверхности контейнера при  $r = R_B$ .

По третьей теории прочности

$$\sigma_{\text{экс}} = \sigma_\theta - \sigma_r \leq [\sigma]$$

При большей толщине стенки на внутренней поверхности контейнера

$$|\sigma_\theta| \approx |\sigma_r| = |P_B|$$

Поэтому  $\sigma_{\text{экр}} = 2P_B \leq [\sigma] = \sigma_T$ , откуда  $P_B = 0,5 \sigma_T$

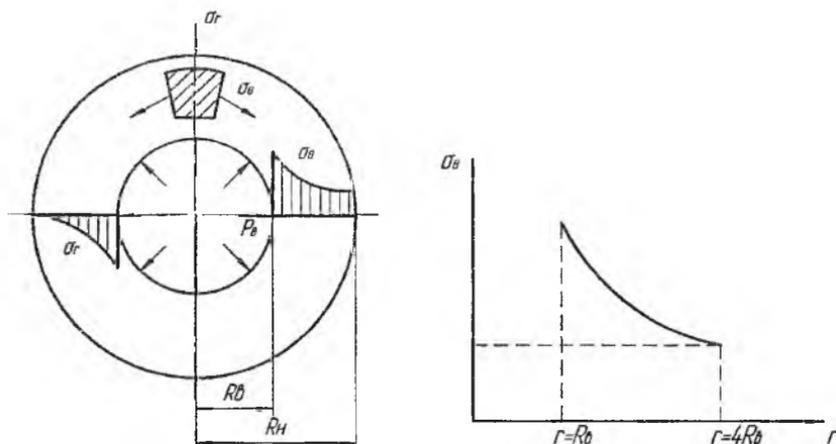


Рис. 73. Распределение напряжений в однослойном контейнере

Таким образом, в однослойном контейнере внутреннее давление не может быть больше половины предела текучести материала контейнера  $\sigma_T$ . На практике с учётом коэффициента запаса  $P_B = 0,3 \sigma_T$ .

Распределение напряжений  $\sigma_\theta$  по толщине стенки можно сделать более равномерным и за счет этого повысить величину внутреннего давления  $P_B$ , если предварительно создать во втулке напряженное состояние, при котором внутренние слои будут сжаты, а наружные растянуты. Такое распределение напряжений возможно в двухслойном контейнере, сборка которого производится посадкой нагретой наружной втулки на холодную внутреннюю, рис. 74. После совместного их охлаждения втулка 1 находится под действием внешнего давления посадки (рис. 74а).

$$P_{II} = \frac{E_{\Delta}}{2r_2^3} \cdot \frac{(r_2^2 - r_1^2) \cdot (r_3^2 - r_2^2)}{(r_3^2 - r_1^2)}$$

где  $\Delta$  - натяг,  $E$  - модуль упругости материала втулок.

В первой втулке  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_r$  - сжимающие напряжения. Вторая втулка находится под действием внутреннего давления  $P_n$ . В ней  $\sigma_\theta$  - растягивающее напряжение, а  $\sigma_r$  - сжимающее напряжение. На границе сопряжения втулок 1 и 2 окружное напряжение изменяется скачкообразно.

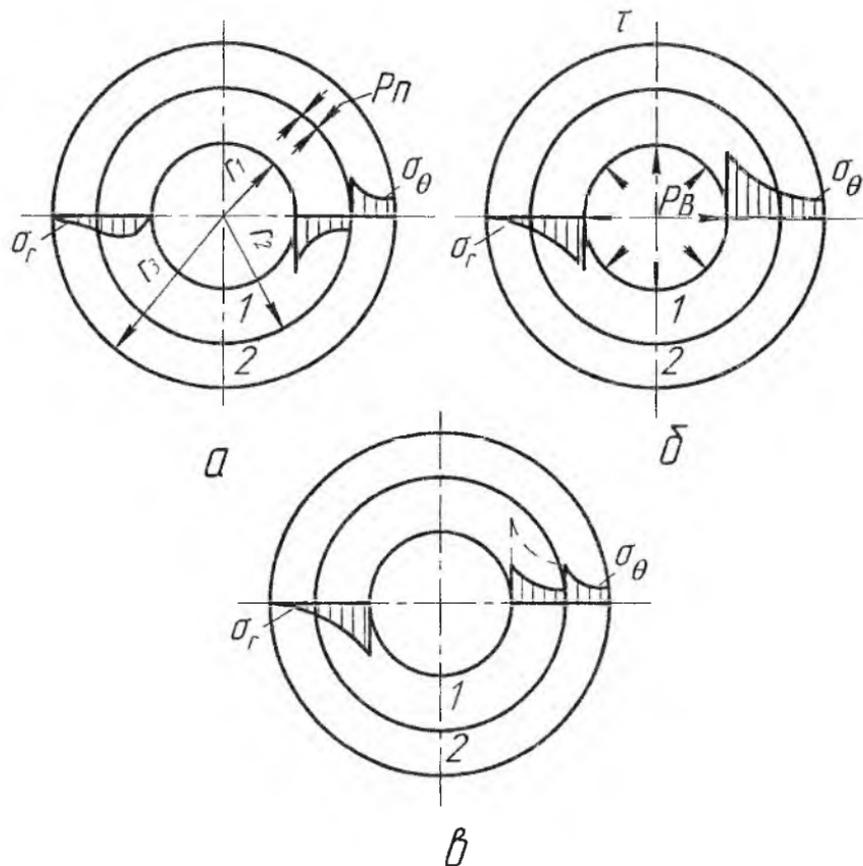


Рис. 74. Распределение напряжений во втулках двухслойного контейнера:

- а) от горячей посадки при сборке,
- б) от давления прессования,
- в) в процессе прессования

При нагружении двухслойного контейнера давлением прессования  $P_H$  (рис. 74б) сборочные напряжения перераспределяются. Этора окружных напряжений получается более равномерной по толщине, так как окружные растягивающие напряжения от давления прессования, складываясь с предварительными окружными напряжениями сжатия, в значительной степени гасятся (рис. 74в). Поэтому допускаемое давление в составном контейнере больше, чем в цельном.

Напряжения во втулках контейнера находят по формулам Ляме. В случае нагружения полого цилиндра равномерным внутренним давлением  $P_B$  на рис. 74.

$$\frac{\sigma_\theta}{\sigma_r} = \frac{P_B \cdot R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} \cdot \left( 1 \pm \frac{R_H^2}{r^2} \right)$$

равномерным внешним давлением  $P_H$

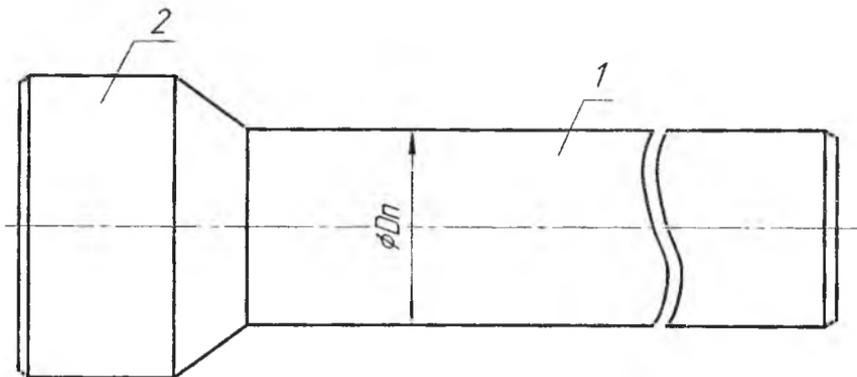
$$\frac{\sigma_\theta}{\sigma_r} = -\frac{P_H \cdot R_H^2}{R_H^2 - R_B^2} \cdot \left( 1 \pm \frac{R_B^2}{r^2} \right)$$

где  $r$  – текущий радиус.

#### 4.4 Пресс-штемпель и пресс-шайба

Пресс-штемпель передает усилие, создаваемое гидропрессом к прессуемому металлу через пресс-шайбу.

Величина допустимой нагрузки, которую может выдержать пресс-штемпель, определяет возможную степень деформации при прессовании. Поэтому выбор материала и конструкции пресс-штемпеля имеет важное значение в технологии прессования. На рис. 75. приведена конструкция штемпеля.



1 – штанга, 2 – головка

Рис. 75. Пресс-штемпель

Конструктивно пресс-штемпель для прессования сплошных профилей изготавливают монолитным, состоящим из головки 2 и штанги 1 (см. рис. 75). После выбора размеров пресс-штемпель проверяют на прочность, при этом его рассматривают сжатый и консольно закрепленный стержень. Обычно продольная сила смещена относительно оси пресс-штемпеля из-за отсутствия идеальной центровки на величину эксцентриситета  $\ell$ . Поэтому при расчете пресс-штемпеля необходимо определять напряжения от сжатия и от продольного изгиба (рис. 76.).

Усилие прессы  $P_{пр}$ , передаваемое пресс-штемпелем на заготовку вызывает в нем напряжение сжатия.

$$\sigma^J = \frac{P_{пр}}{F_{II}}$$

где  $F_{II}$  – площадь поперечного сечения пресс-штемпеля,

$$F_{II} = \frac{\pi \cdot D_{II}^2}{4}$$

$D_{II}$  – диаметр пресс-штемпеля.

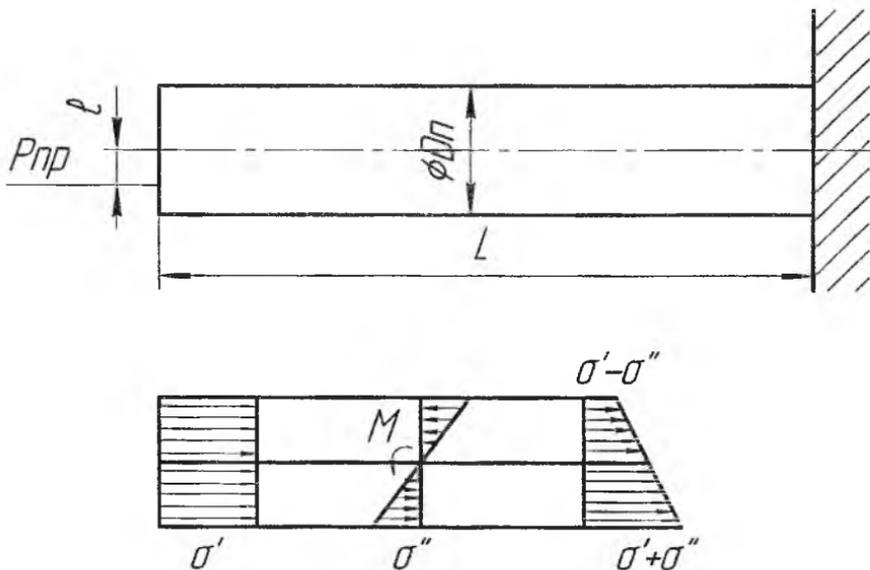


Рис. 76. Схема к расчету пресс-штампеля на прочность

При эксцентрично приложенной нагрузке в пресс-штампеле возникает дополнительное изгибающее напряжение  $\sigma''$ .

$$\sigma'' = \frac{M}{W},$$

где  $M$  – изгибающий момент

$$M = P_{пр} \cdot l$$

$l$  – эксцентриситет

$$l = \frac{D_K - D_{П}}{4},$$

$W$  – момент сопротивления изгибу, для круга;  $W = 0,1D_{П}^3$ .

На эпюрах (рис. 76.) видно, что полное напряжение на пресс-штампеле равно сумме напряжений от силы  $P_{пр}$  и изгибающего момента  $M$ .

Полное напряжение на пресс-штампеле сравнивают с допустимым:

$$\sigma_{II} = \sigma' + \sigma'' \leq [\sigma],$$

где  $[\sigma] = \sigma_B$

Значение предела прочности  $\sigma_B$  определяют при температуре разогрева металла пресс-штемпеля, не превышающей 250°C.

Диаметр пресс-штемпеля выполняют на 10-20 мм меньше диаметра рабочей втулки контейнера  $D_K$ . Причем меньшее значение назначают для небольших по габаритам контейнеров, большие - для крупногабаритных контейнеров. Длину рабочей части пресс-штемпеля берут несколько большей, чем длина контейнера  $L_{\text{конт.}}$

$$L = L_{\text{конт}} + 0,5D_K$$

Для увеличения сопротивления продольному изгибу пресс-штыбель рекомендуется делать ступенчатым с утолщенной частью рабочего стержня (рис. 75).

Пресс-шайба применяется при прессовании для предохранения пресс-штемпеля от теплового воздействия со стороны деформируемого металла. Пример конструкции пресс-шайбы приведен на рис. 77.

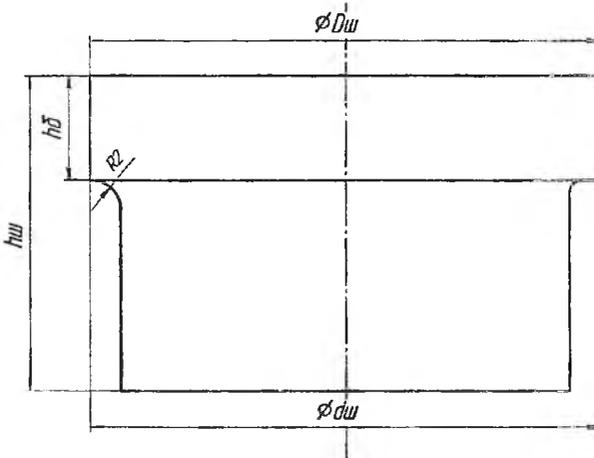


Рис. 77. Пресс-шайба

Основными технологическими размерами пресс-шайбы являются рабочий диаметр  $D_{ш}$  и высота  $h_{ш}$ . Диаметр пресс-шайбы принимают равным диаметру отверстия внутренней втулки  $D$  за вычетом величины технологического зазора  $a$ :  $D_{ш} = D_k - a$ , где  $a = 0,1 - 0,5$  мм. Высота пресс-шайбы принимается  $h_{ш} = (0,3 - 0,5)D_k$ . Для уменьшения контактной поверхности с контейнером на пресс-шайбе выполняют буртик  $h_b = (0,1 - 0,15)D_k$ . Опорная поверхность пресс-шайбы имеет диаметр, равный диаметру пресс-штемпеля  $d_{ш} = D_{п}$ .

Пресс-шайбы при конструировании рассчитывают на смятие. При этом принимают допустимое удельное давление равными  $(0,9 - 0,95) \sigma_t$  выбранной стали при заданных температурных условиях.

Пресс-шайбы, воспринимая в процессе деформации полное давление прессования, подвергаются циклическому температурному нагружению. Поэтому их изготавливают из поковок жаропрочных легированных сталей. Для исключения перегрева пресс-шайб в процессе прессования используют набор пресс-шайб (6 – 8 шт.), что позволяет организовать эффективный режим их охлаждения и существенно повысить стойкость пресс-шайб и пресс-штемпелей.

#### 4.5 Вопросы для самоконтроля

1. Что входит в состав инструментальной наладки?
2. Перечислите основные элементы конструкции матрицы.
3. Как классифицируют матрицы по форме обжимной части?

Посадочной поверхности?

4. С какой целью целесообразно применять многоканальные матрицы?
5. Когда применяют сборные матрицы?
6. Перечислите основные функции калибрующих поясков.

7. В каких случаях используют параллельные и сходящиеся пояски?
8. Как стремятся расположить канал на зеркале матрицы?
9. Какие участки канала матрицы называют консольными?
10. Каков порядок расчета консольных участков матрицы на прочность?
11. В чем различие исполнительных размеров канала матрицы и размеров на чертеже прессуемого профиля?
12. Как рассчитать длины калибрующих поясков по формуле Матвеева-Журавского?
13. Какие нагрузки испытывает пресс-штемпель при прессовании профилей?
14. Зачем нужна пресс-шайба?
15. Как выбрать размеры пресс-шайбы?
16. Что собой представляет конструкция контейнера?
17. Почему контейнер выполняют многослойным?
18. Как обеспечивают нагрев контейнера перед прессованием?
19. Перечислите способы выравнивания скоростей истечения отдельных элементов профиля.
20. Как получить точный профиль при прессовании?
21. Каковы преимущества плоских матриц перед коническими?
22. Как рассчитать пресс-штемпель на прочность?
23. Какие принципы заложены в проектирование многоканальных матриц?
24. Какие элементы матрицы являются предметом проектирования?
25. Какие факторы учитывают при назначении размеров канала матрицы?

## 4.6 Задачи и упражнения

1. Найти рациональное положение канала на зеркале матрицы для профилей с поперечными сечениями (рис. 78.).

2. Определить рациональное расположение каналов в матрице для многократного прессования асимметричных профилей, обеспечивающее их симметрию относительно центра матрицы, по табл. 10.

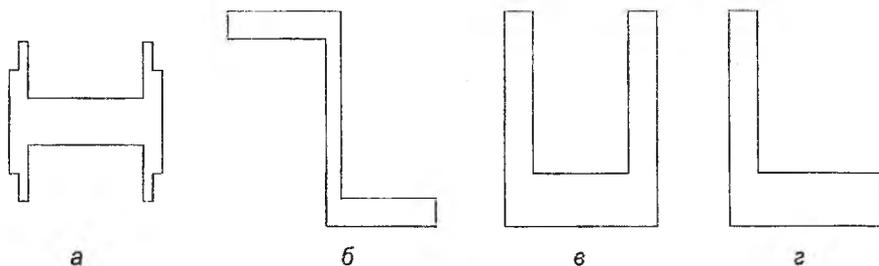


Рис. 78. Типы профилей

Табл. 10. Данные для расчетов

| Вариант       | 1    | 2    | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------|------|------|---|---|---|---|---|
| Сечение       |      |      |   |   |   |   |   |
| Число каналов | 2, 4 | 2, 4 | 3 | 2 | 6 | 2 | 2 |

3. Разбить сечение профилей (рис. 79) на несколько элементов равной ширины. Среди них найти элементы с наибольшим и наименьшим удельным периметром. Рассчитать длины калибрующих поясков по элементам и дать их развертку по периметру профиля.

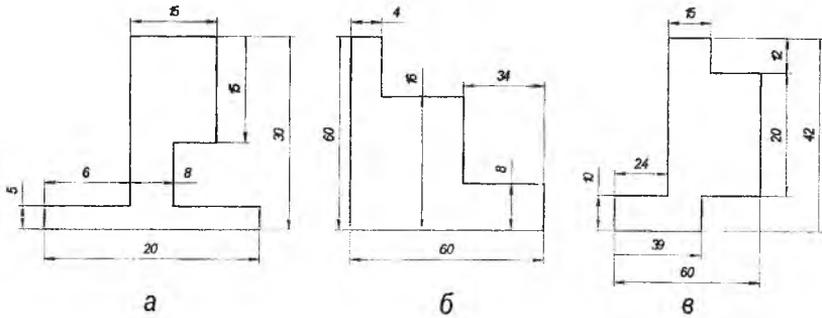


Рис. 79. Поперечные сечения профилей

Решение. Разделение сечения профиля «а» на элементы равной ширины I, II, III показано на рис. 79. Удельные периметры по элементам равны:

$$\frac{\Pi_I}{F_I} = \frac{15+15+15+15}{225} = 0,27;$$

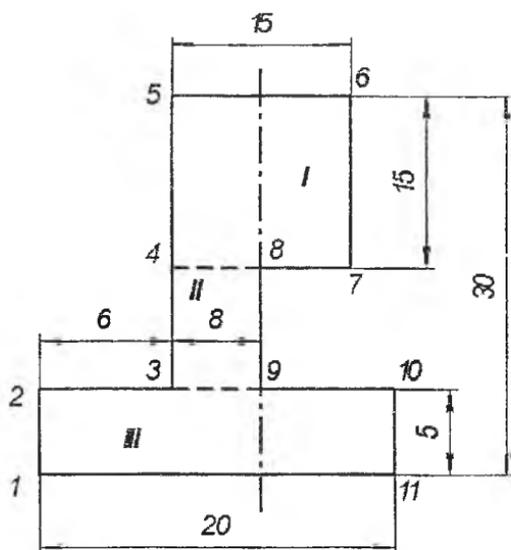
$$\frac{\Pi_{II}}{F_{II}} = \frac{10+10+8+8}{80} = 0,45;$$

$$\frac{\Pi_{III}}{F_{III}} = \frac{20+20+5+5}{100} = 0,5$$

Задавшись длиной калибрующего пояска для элемента III с наибольшим удельным периметром в пределах 3 – 5 мм, по формуле Матвеева-Журавского найдем длины калибрующих поясков для остальных элементов. Приняв  $l_{III} = 5$  мм, получим:

$$l_I = l_{III} \cdot \frac{\Pi_{III} / F_{III}}{\Pi_I / F_I} = 5 \cdot \frac{0,5}{0,27} = 9,3 \text{ мм}$$

$$l_{II} = l_{III} \cdot \frac{\Pi_{III} / F_{III}}{\Pi_{II} / F_{II}} = 5 \cdot \frac{0,5}{0,45} = 5,6 \text{ мм}$$



Развёртка калибрующих поясков

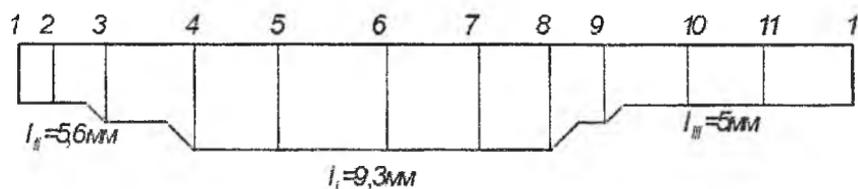


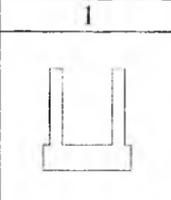
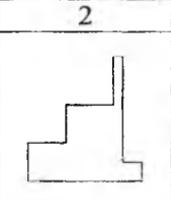
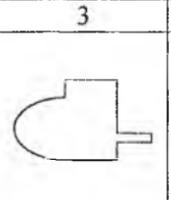
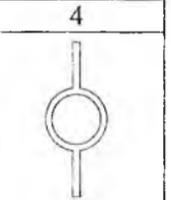
Рис. 80. К расчету размеров поясков

По найденным значениям строят развёртку калибрующих поясков по контуру канала матрицы, рис. 80. При расчете по этой методике получается одинаковая длина пояска вдоль всего периметра элемента. При переходе от одного элемента к другому выполняют плавный переход с учетом среднего расчетного значения длины пояска.

4. Выбрать способы выравнивания скоростей истечения отдельных элементов сечения профиля, представленных в табл. 11.

5. Провести расчет консольного участка матрицы на изгиб для прессования прутков  $\varnothing 20$  мм при удельном давлении  $p = 750$  МПа,  $l_{\text{кан}} = 5$  мм, диаметре выходной части  $\varnothing = 24$  мм.

Табл. 11. Виды профилей для расчетов

| Вариант | 1   | 2   | 3   | 4   |
|---------|---|---|---|---|
| Сечение |  |  |  |  |

6. Провести расчет консольных элементов матриц на изгиб и срез по данным задачи 3, если удельное давление в очаге пластической деформации  $P = 600$  МПа,  $D_k = 100$  мм.

7. Определить исполнительные размеры очка матрицы для прессования профиля типа «тавр» из сплава Д16 (рис. 81). Материал матрицы – сталь 3Х2В8Ф. Температура нагрева заготовки  $450^\circ\text{C}$ , матрицы  $400^\circ\text{C}$ .

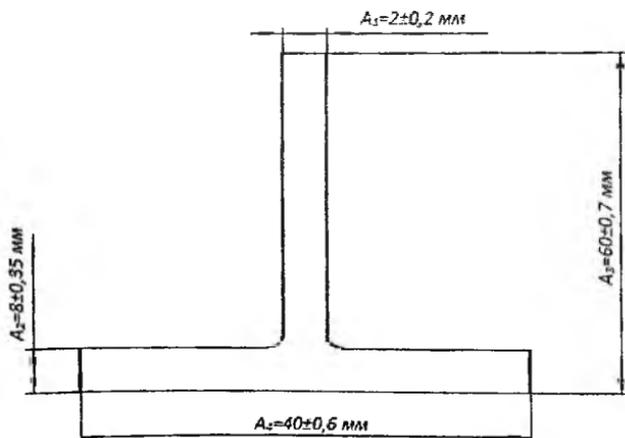


Рис. 81. Поперечное сечение таврового профиля

Решение:

Для сплава Д16:  $\alpha_{\text{заг}} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$

Для стали 3Х2В8Ф:  $\alpha_{\text{матр}} = 14 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$

Определяем  $K_T$ :

$$K_T = T_{\text{заг}} \cdot \alpha_{\text{заг}} - T_{\text{матр}} \cdot \alpha_{\text{матр}} = 450 \cdot 25 \cdot 10^{-6} - 400 \cdot 14 \cdot 10^{-6} = 0,006$$

Принимаем  $K_T = 0,006$ .

Определяем исполнительные размеры очка матрицы:

1. Для толщины полки  $A_1 = 2^{\pm 0,2}$

$$A_1 = 2 + 0,2 + (0,02 + 0,02 + 0,006) \cdot 2 = 2,29 \text{ мм}$$

2. Для толщины  $A_2 = 8^{\pm 0,2}$

$$A_2 = 8 + 0,35 + (0,01 + 0,01 + 0,006) \cdot 8 = 8,55 \text{ мм}$$

3. Для размера  $A_3 = 60^{\pm 0,7}$

$$A_3 = 60 + 0,7 + (0,0055 + 0,008 + 0,006) \cdot 60 = 61,87 \text{ мм}$$

4. Для размера  $A_4 = 40^{\pm 0,6}$

$$A_4 = 40 + 0,6 + (0,0065 + 0,008 + 0,006) \cdot 40 = 41,4 \text{ мм}$$

Ввиду того, что обычно расчетные размеры очка матрицы округляются с точностью до 0,1 мм, для рассматриваемого профиля можно назначить следующие исполнительные размеры:  $A_1 = 2,3 \text{ мм}$ ;  $A_2 = 8,6 \text{ мм}$ ;  $A_3 = 61,9 \text{ мм}$ ;  $A_4 = 41,4 \text{ мм}$ .

8. Указать факторы, определяющие исполнительные размеры очка матрицы. Определить исполнительные размеры для профилей, представленных в задаче 4.

9. При прессовании прутка диаметром 20 мм с коэффициентом вытяжки 50 на прессе усилием 15,0 МН матрица вышла из строя из-за пластической деформации калибрующего пояска. Матрица была изготовлена из стали 5ХНМ с  $\sigma_{\text{в}}/\Gamma = 450 \text{ }^\circ\text{C} = 800 \text{ МПа}$ . Диаметр выходной части канала равен 26 мм, а высота пояска 3 мм. Указать причину выхода матрицы из строя и провести соответствующие расчеты.

10. Определить диаметр наименьшего контейнера на прессе усилием 150 МН, если материал пресс-штемпеля выдерживает напряжение на сжатие 1000 МПа.

11. На прессе усилием 12,0 МН установлен пресс-штемпель диаметром 150 мм, изготовленный из высокопрочной стали 3Х2В8Ф с  $\sigma_{\text{в}} = 1300$  МПа. Пресс-штемпель работает в трудных условиях, испытывая напряжения от сжатия и изгиба, вызванного смещением усилия прессования от оси прессования на величину 5 мм. Исходя из условий работы пресс-штемпеля, провести его расчет на прочность.

12. Стальной контейнер, внешний диаметр которого 300 мм и толщина стенки 60 мм, подвергнут внутреннему давлению  $p_1 = 300$  МПа. Определить величину наибольших растягивающих и сжимающих напряжений. Построить эпюры  $\sigma_{\theta}$ ,  $\sigma_{\rho}$ .

13. В задаче 12 поменять условие, т.е. считать, что действует не внутреннее, а внешнее давление. Определить те же величины.

14. Принять, что стальной контейнер (задача 12) подвергнут не только внутреннему давлению  $p_1 = 300$  МПа, но и внешнему давлению  $p_2 = 100$  МПа. Определить те же величины.

15. Определить напряжение в стальном контейнере, состоящем из втулки ( $r_1 = 80$  мм,  $r_2 = 180$  мм) и корпуса ( $r_3 = 270$  мм). Натяг по диаметру при посадке втулки  $2 \delta = 0,3$  мм, а внутреннее давление  $P = 500$  МПа. Построить эпюры напряжений.

16. Дана система, состоящая из корпуса и двух втулок с размерами:  $r_1 = 60$  мм,  $r_2 = 80$  мм,  $r_3 = 120$  мм и  $r_4 = 220$  мм. Натяг между первой и второй втулками  $2 \delta_1 = 0,2$  мм, а между втулкой и корпусом  $2 \delta_2 = 0,3$  мм. Внутреннее давление  $p_1 = 600$  МПа. Корпус и втулка стальные. Определить напряжения и построить их эпюры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бережной В.Л., Щерба В.Н., Батурин А.И. Прессование с активным действием сил трения. – М.: Металлургия, 1988. – 296 с.
2. Грабарник Л.М., Нагайцев А.А. Прессование цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1983. – 240 с.
3. Горячее прессование труб и профилей / Ю.В. Манегин, А.Э. Притоманов, Шмиттель Т. и др. – М.: Металлургия, 1980. – 272 с.
4. Гильдергорн М.С., Керров В.Г., Кривонос Г.А. Прессование со сваркой полых изделий из алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1975. 239 с.
5. Гильдегорн М.С. Основы теории совместного прессования разнопрочных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1981. – 144 с.
6. Гун Г.Я., Яковлев В.И., Прудковский Б.А. и др. Прессование алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1974.
7. Ерманок М.З., Фейгин В.И., Сухоруков М.А. Прессование профилей из алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1977. - 263
8. Ерманок М.З. Каган Л.С., Головинов М.Ф. Прессование труб из алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 247 с.
9. Ерманок М.З. Прессование панелей из алюминиевых сплавов. МС.:Металлургия, 1974. – 231 с.
10. Ерманок М.З., Соболев Ю.П., Гельман А.А. Прессование титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 264 с.
11. Ерманок М.З. Фейгин В. И. Производство профилей из алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1972. – 272 с.
12. Ерманок М.З. Прессование труб и профилей специальной формы. – М.: Металлургия, 1992. – 305 с.

13. Жолобов В.В., Зверев Г.И. Прессование металлов. – М.: Металлургия, 1971. 456 с.
14. Жолобов В.В., Зверев Г.И. Инструмент для горячего прессования металлов. – М.: Машиностроение, 1965. - 163 с.
15. Жолобов В.В., Зверев Г.И. Оборудование гидропрессовых цехов. – М.: Металлургия, 1974. – 271 с.
16. Инструмент для горячего прессования тяжёлых металлов и сплавов / Ю.Ф. Шевакин и др. – М.: Металлургия, 1983. - 217 с.
17. Каталог. Прессованные профили. М.: Оборонгиз 1975. - 356 с.
18. Каргин В.Р. Процессы получения винтовых профилей и труб. – М.: Металлургия, 1994. – 96 с.
19. Колпашников А.И., Вялов В.А, Гидропрессование металлов. – М.: Металлургия, 1973. – 296 с.
20. Корнилов В.Н. Непрерывное прессование со сваркой алюминиевых сплавов. – Красноярск, 1993. – 216 с.
21. Кузьменко В.А. Прессование алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 108 с.
22. Матвеев Б.И., Журавский Е.Б. Расчёт и конструирование одноочковых матриц для прессования профилей из деформируемых сплавов.- М.: Оборонгиз, 1951.
23. Прозоров Л.В., Костава А.А., Ревтов В.Д. Прессование металлов жидкостью высокого давления. – М.: металлургия, 1972. 152 с.
24. Прозоров Л.В. Прессование стали и тугоплавких металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 244 с.
25. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 448 с.
26. .Производство полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: Справочник. – М.: Металлургия, 1985. – 350 с.

27. Прессование алюминиевых сплавов / Г.Я. Гун, В.Н. Яковлев, Б.А., Прудковский и др. – М.: Metallurgy, 1974. - 336 с.
28. Профили, прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. ГОСТ 8617-81. М.: Изд-во стандартов, 1984. – 25с.
29. Профили прессованные из алюминиевых и магниевых сплавов. Кн. 1. Справочник-каталог /Б.И. Бондарев, Г.В. Лытнева, Ф.В. Николаев и др. - М.: Metallurgy, 1989. – 560 с.
30. Райтбарг Л.Х. Прессование лёгких сплавов. – М.: Metallurgy, 1988. – 160 с.
31. Райтбарг Л.Х. Производство прессованных профилей. – М.: Metallurgy 1984. - 264 с.
32. Старостин Ю.С., Головинов М.Ф., Каргин В.Р. Ребристые трубы из алюминиевых сплавов. – М.: Metallurgy, 1983. – 134 с.
33. Технология обработки давлением цветных металлов и сплавов / А.В. Зиновьев, А.И. Колпашников, П.И. Полухин и др. – М.: Metallurgy. 1992. – 512 с.
34. Шевякин Ю.Ф., Грабарник Л.М., Нагайцев А.А. Прессование тяжёлых цветных металлов и сплавов. – М.: Metallurgy, 1987. – 246 с.
35. Щерба В.Н. Прессование алюминиевых сплавов. – М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 768 с.
36. Шур И.А. Технологическое оборудование для прессования металлов. – М.: Metallurgy, 1983. – 192 с.
37. Эверхарт Г. Холодное прессование металлов. – М.: Машиностроение, 1968. – 174 с.

Учебное издание

*Быков Александр Петрович*  
*Каргин Владимир Родионович*  
*Каргин Борис Владимирович*

**ПРЕССОВАНИЕ**

*Учебное пособие*

Редактор Каргин В.Р.

Подписано в печать - 14.04.2010. Формат - 60x84 1/16.

Бумага - офсетная. Печать - оперативная.

Усл. печ. л. - 9,2.

Тираж - 100 экз. Заказ – 042. Арт.- 02/2010.

Самарский государственный аэрокосмический университет.

443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

---

Издательство НОУ ВПО «Международный институт рынка»

443030, г. Самара, ул. Желябова, 21