

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования "Витебский государственный  
технологический университет"**

**С.С. Клименков**

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ЗАГОТОВОК**

**Учебник**

**Допущено**

**Министерством образования Республики Беларусь  
в качестве учебника для студентов машиностроительных  
специальностей учреждений, обеспечивающих получение высшего  
образования**

Библиотека ВГТУ



**Витебск  
2005**

УДК 621.762

ББК 34.39

К49

Рецензенты: д.т.н., проф., Мрочек Ж.А. (БНТУ)  
к.т.н., доц. Акулич А.П., зав. кафедрой «Технология  
машиностроения» УО «БГТУ»

**Клименков С.С.**

**К49** Проектирование и производство заготовок.: Учебник для вузов/Клименков С.С. – Витебск: УО  
«ВГТУ», 2004. - 385 с.

ISBN – 985-6655-96-X.

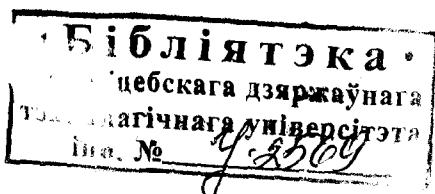
Рассматриваются вопросы производства и проектирования заготовок из листового материала, порошковых материалов; формообразования заготовок методами объемного деформирования; производства заготовок литьем, а также сварки и ливки заготовок.

Учебник составлен в соответствии с учебной программой «Проектирование и производство заготовок» для студентов специальности 1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов». Для студентов высших учебных заведений.

УДК 621.762  
ББК 34.39

ISBN – 985-6655-96-X

© Клименков С.С. 2004 г.  
© Издательство УО «ВГТУ»



# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>                                                              | <b>5</b>   |
| <b>1. ПРОИЗВОДСТВО ЗАГОТОВОК ИЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА.....</b>                      | <b>6</b>   |
| 1.1 Операции листовой штамповки.....                                              | 6          |
| 1.2 Резка листового материала ножницами.....                                      | 9          |
| 1.3 Резание при вырубке и пробивке.....                                           | 13         |
| 1.4 Чистовая вырубка и пробивка.....                                              | 15         |
| 1.5 Расчет исполнительных размеров матриц и пуансонов.....                        | 21         |
| 1.6 Раскрой листового материала.....                                              | 23         |
| 1.7 Гибка листового материала.....                                                | 26         |
| 1.8 Силовые параметры гибки.....                                                  | 29         |
| 1.9 Профилирование.....                                                           | 31         |
| 1.10 Гибка с растяжением и сжатием.....                                           | 33         |
| 1.11 Вытяжка.....                                                                 | 36         |
| 1.12 Технологические расчеты при вытяжке.....                                     | 41         |
| 1.13 Вытяжка с утонением.....                                                     | 45         |
| 1.14 Особые способы вытяжки.....                                                  | 49         |
| 1.15 Отбортовка отверстий.....                                                    | 53         |
| 1.16 Обжим.....                                                                   | 57         |
| 1.17 Раздача.....                                                                 | 60         |
| 1.18 Комбинированная штамповка.....                                               | 62         |
| 1.19 Импульсная штамповка.....                                                    | 65         |
| 1.20 Технологичность конструкций из листового материала.....                      | 72         |
| 1.21 Разработка технологического процесса.....                                    | 76         |
| <b>2. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЗАГОТОВОК МЕТОДАМИ ОБЪЕМНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ.....</b>       | <b>78</b>  |
| 2.1 Общая характеристика процесса.....                                            | 78         |
| 2.2 Исходные материалы.....                                                       | 79         |
| 2.3 Резка металла на заготовки.....                                               | 81         |
| 2.4 Термический режим объемного деформирования заготовок.....                     | 87         |
| 2.5 Использование сверхпластичности металлов и сплавов в обработке давлением..... | 91         |
| 2.6 Объемная горячая штамповка в открытых штампах.....                            | 94         |
| 2.7 Ручьи штампов объемной штамповки.....                                         | 101        |
| 2.8 Штамповка в закрытых штампах.....                                             | 104        |
| 2.9 Штамповка выдавливанием.....                                                  | 105        |
| 2.10 Штамповка на молотах.....                                                    | 108        |
| 2.11 Штамповка на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП).....              | 112        |
| 2.12 Штамповка на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ).....                       | 115        |
| 2.13 Штамповка на гидравлических прессах.....                                     | 118        |
| 2.14 Формообразование поковок методами прокатки.....                              | 124        |
| 2.15 Прессование.....                                                             | 134        |
| 2.16 Гидропрессование.....                                                        | 141        |
| 2.17 Волочение.....                                                               | 150        |
| 2.18 Особенности проектирования поковок.....                                      | 157        |
| 2.19 Разработка технологического процесса штамповки.....                          | 167        |
| <b>3. ПРОИЗВОДСТВО ЗАГОТОВОК ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ.....</b>                    | <b>169</b> |
| 3.1 Общие сведения о производстве изделий из порошков.....                        | 169        |
| 3.2 Свойства порошков.....                                                        | 171        |
| 3.3 Подготовка порошков к прессованию.....                                        | 175        |

|      |                                                                             |            |
|------|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.4  | Прессование порошков в закрытой пресс-форме.....                            | 177        |
| 3.5  | Практика прессования порошков в жестких закрытых пресс-формах.....          | 183        |
| 3.6  | Расчет и конструирование формообразующего инструмента.....                  | 186        |
| 3.7  | Проектирование и изготовление пресс-форм.....                               | 192        |
| 3.8  | Проектирование порошковых заготовок, формуемых в закрытых пресс-формах..... | 198        |
| 3.9  | Изостатическое прессование.....                                             | 202        |
| 3.10 | Импульсное формование.....                                                  | 215        |
| 3.11 | Прокатка порошков.....                                                      | 220        |
| 3.12 | Формование заготовок из пластифицированных порошков.....                    | 226        |
| 3.13 | Шликерное формование.....                                                   | 230        |
| 3.14 | Спекание.....                                                               | 233        |
| 3.15 | Дополнительные технологические операции.....                                | 238        |
| 3.16 | Точность изделий, получаемых методами порошковой металлургии.....           | 241        |
| 3.17 | Применение порошковых конструкционных изделий.....                          | 242        |
| 4.   | <b>ПРОИЗВОДСТВО ЗАГОТОВОК ЛИТЬЕМ.....</b>                                   | <b>246</b> |
| 4.1  | Общие сведения о литейном производстве.....                                 | 246        |
| 4.2  | Литейные сплавы и их свойства.....                                          | 247        |
| 4.3  | Литье в песчаные формы.....                                                 | 253        |
| 4.4  | Литье по выплавляемым моделям.....                                          | 260        |
| 4.5  | Литье в кокиль.....                                                         | 264        |
| 4.6  | Литье под регулируемым давлением.....                                       | 269        |
| 4.7  | Литье под давлением.....                                                    | 275        |
| 4.8  | Литье с кристаллизацией под давлением.....                                  | 280        |
| 4.9  | Центробежное литье.....                                                     | 287        |
| 4.10 | Непрерывное литье.....                                                      | 291        |
| 4.11 | Электрошлаковое литье.....                                                  | 296        |
| 4.12 | Технологичность отливок.....                                                | 299        |
| 4.13 | Проектирование отливок.....                                                 | 307        |
| 5.   | <b>СВАРКА ЗАГОТОВОК.....</b>                                                | <b>325</b> |
| 5.1  | Дуговая сварка.....                                                         | 325        |
| 5.2  | Электрошлаковая сварка.....                                                 | 331        |
| 5.3  | Холодная сварка.....                                                        | 338        |
| 5.4  | Диффузионная сварка.....                                                    | 341        |
| 5.5  | Сварка трением.....                                                         | 344        |
| 5.6  | Сварка прокаткой.....                                                       | 348        |
| 5.7  | Сварка взрывом.....                                                         | 352        |
| 5.8  | Стыковая сварка.....                                                        | 354        |
| 5.9  | Точечная и шовная сварка.....                                               | 356        |
| 5.10 | Требования к сварным конструкциям.....                                      | 359        |
| 5.11 | Технологичность сварных соединений.....                                     | 363        |
| 6.   | <b>ПАЙКА ЗАГОТОВОК.....</b>                                                 | <b>365</b> |
| 6.1  | Общие сведения о методах пайки.....                                         | 365        |
| 6.2  | Способы пайки.....                                                          | 367        |
| 6.3  | Конструктивно-технологические особенности паяных соединений.....            | 373        |
| 6.4  | Дефекты пайки.....                                                          | 379        |
|      | <b>РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....</b>                                        | <b>381</b> |
|      | <b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....</b>                                            | <b>383</b> |



## ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей составной частью подготовки специалистов машиностроительного профиля является дисциплина «Проектирование и производство заготовок». В процессе изучения студенты должны ознакомиться с основными технологическими процессами формообразования заготовок; научиться анализировать процессы с технологической и экономической позиции; уметь выбрать оптимальный вариант; технологически грамотно выполнить чертеж заготовки; разработать технологический процесс ее производства; подобрать необходимое оборудование.

В процессе изучения студентам предлагалась специальная литература по соответствующим разделам обработки давлением, порошковой металлургии, литейного производства и сварки.

Отсутствие в библиотеках в достаточном количестве рекомендуемой литературы вызывает определенные сложности в организации учебного процесса. Предлагаемый учебник является попыткой методически системно соединить в одной книге вопросы проектирования заготовок с технологиями их изготовления.

Учебник подготовлен в соответствии с базовыми программами специальностей: 1-36 01 01 «Технология машиностроения», 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства», 1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов» и может быть использован студентами других специальностей.

Учебник послужит основой для разработки методического комплекса для выполнения курсового проекта; проведения лабораторных и практических занятий.

Учебник написан на основе отечественной и зарубежной литературы. Автором использован личный производственный опыт по проектированию обрабатывающего инструмента, многолетний опыт преподавания в ВУЗе и накопленный материал при подготовке к изданию учебных пособий «Основы эффективных технологий формообразования», «Инструмент и обработка материалов», «Нормирование точности и технические измерения».

Безусловно, учебник не свободен от недостатков, и автор заранее признателен тем, кто сочтет нужным внести предложения по углублению и совершенствованию учебника.

АВТОР

# 1. ПРОИЗВОДСТВО ЗАГОТОВОК ИЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА

## 1.1. Операции листовой штамповки

Использование листов в качестве исходного материала для формирования плоских и объемных заготовок методом штамповки является наиболее прогрессивным и распространенным технологическим процессом производства. Листовая штамповка имеет ряд преимуществ перед другими видами обработки. В техническом отношении к преимуществам листовой штамповки относятся: возможность изготовления сложных заготовок; возможность выполнения сборочных работ; возможность осуществления точной обработки контура заготовок и отверстий с корригированием межцентровых расстояний; возможность изготовления легких и прочных конструкций при минимальном расходе металла; широкие возможности автоматизации.

В экономическом отношении листовая штамповка обладает следующими преимуществами: экономным использованием материала и сравнительно небольшими отходами; высокой производительностью оборудования; низкой стоимостью изготовления заготовок.

Листовая штамповка применяется для изготовления самых разнообразных заготовок практически во всех отраслях промышленности - от микроэлектроники до ракетостроения и атомного энергостроения. В машиностроении методами листовой штамповки изготавливают 55-70% заготовок, в приборостроении - до 75%, а в производстве товаров широкого потребления - до 98%.

Листовая штамповка наиболее широко применяется в массовом и крупносерийном производстве. Опыт показывает, что она может с успехом применяться в мелкосерийном производстве. Однако для этого необходимо использовать специальные средства и способы штамповки, обеспечивающие выпуск мелких партий заготовок с минимальными затратами.

Операции листовой штамповки разделяются на две группы: разделительные и формообразующие (таблица 1.1, 1.2). *Разделительные операции* предназначены для полного или частичного отделения одной части металла от другой. *Формообразующие операции* предназначены для объемного пластического формообразования плоских заготовок.

Таблица 1.1.

Схемы основных разделительных операций и их определение по ГОСТ 18970-84

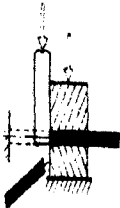
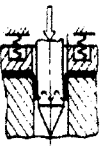
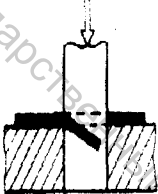
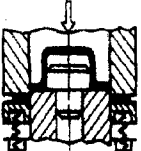
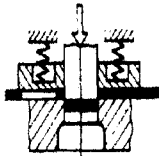
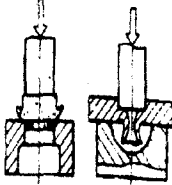
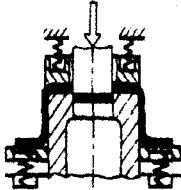
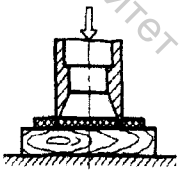
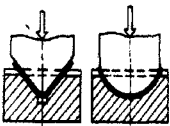
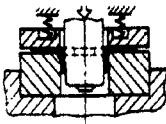
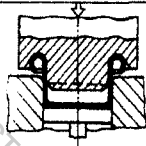
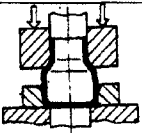
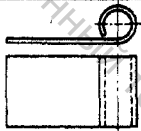
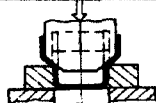
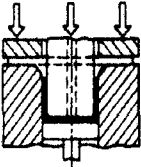
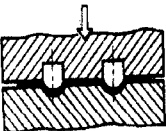
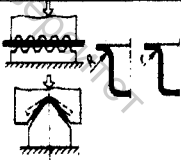
| Термин и его определение                                                                                                                     | Схема операции                                                                      | Термин и его определение                                                                                                                                                       | Схема операции                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Отрезка</b> – полное отделение части заготовки по незамкнутому контуру путем сдвига                                                       |    | <b>Проколка</b> – образование в заготовке отверстия без удаления металла в отход                                                                                               |    |
| <b>Надрезка</b> – неполное отделение заготовки путем сдвига                                                                                  |    | <b>Обрезка</b> – удаление излишков металла (припусков, облоя) путем сдвига                                                                                                     |    |
| <b>Вырубка</b> – полное отделение заготовки или изделия от исходной заготовки по замкнутому контуру путем сдвига (отдельная часть – изделие) |    | <b>Зачистка</b> – удаление технологических припусков с помощью штампа с образованием стружки для повышения точности размеров и уменьшения шероховатости штамповочной заготовки |    |
| <b>Пробивка</b> – образование отверстия или паза путем сдвига с удалением отдельной части металла в отход                                    |  | <b>Просечка в штампе</b> – образование отверстия в заготовке путем внедрения в нее инструмента с удалением части материала в отход                                             |  |

Таблица 1.2

Схемы формоизменяющих операций листовой штамповки и их определение по ГОСТ 18970-84

| Термин и его определение                                                                                   | Схема операции                                                                      | Термин и его определение                                                                                                                    | Схема операции                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Гибка</b> – образование или изменение углов между частями заготовки или придание ей криволинейной формы |    | <b>Отбортовка</b> – образование борта по внутреннему контуру заготовки                                                                      |    |
| <b>Закатка</b> – образование закругленных бортов на краях полый заготовки                                  |    | <b>Обжим в штампе</b> – уменьшение размеров поперечного сечения части полый заготовки                                                       |    |
| <b>Завивка</b> – образование закруглений на концах плоской заготовки или заготовки из проволоки            |    | <b>Раздача</b> – увеличение размеров поперечного сечения части полый заготовки                                                              |    |
| <b>Вытяжка</b> – образование полый заготовки или изделия из плоской или полый исходной заготовки           |   | <b>Рельефная формовка</b> – образование рельефа в листовой заготовке за счет местных растяжений без обусловленного изменения толщины стенки |    |
| <b>Обтяжка</b> – образование заготовки заданной формы приложением растягивающих усилий к ее краям          |  | <b>Правка давлением</b> – устранение искаженной формы заготовки, уменьшение радиусов сопряжений отдельных участков заготовки                |  |

К заготовительным операциям относятся: правка листов и полос на листопрямильных машинах и правильных валках, а также резка листов на полосы или

штучные заготовки. Ряд операций выполняется на давяльных, роликовых и накатных станках.

*Вспомогательными операциями* являются: смазка заготовки, фосфатирование, зачистка заусенцев, виброгалтовка, обкатка в барабане, обезжиривание, травление, промывка.

К *термическим операциям* относятся: отжиг заготовок, закалка, отпуск.

К *отделочным* относятся следующие операции: полирование, лакировка, окрашивание, оксидирование, металлизация, декоративные и противокоррозионные покрытия (цинкование, меднение, лужение, никелирование, хромирование, кадмирование и т.д.).

### **1.2. Резка листового материала ножницами**

Листовые материалы разрезают на полосы или заготовки на гильотинных, дисковых, вибрационных ножницах или отрезных штампах.

Процесс резки листового материала состоит из трех последовательных стадий: упругой, пластической деформации и хрупкого разрушения.

В стадии *упругих деформаций* напряжения в материале не превышают предела упругости; в стадии *пластической деформации* напряжения в разрезаемом материале больше предела текучести, но меньше сопротивления сдвигу и в стадии *разрушения* напряжения в материале соответствуют сопротивлению сдвига.

Как следует из схемы действия сил (рис. 1.1, а), силы  $P_1$  образуют пару с опрокидывающим моментом

$$M = P_1 a, \quad (1.1)$$

где  $a$  – плечо между точками приложения сил, примерно равно  $(1,5-2)Z$ ;

$Z$  – зазор между ножами.

Под действием опрокидывающего момента материал стремится повернуться, занять наклонное положение и заклинить между ножами, при этом возникает боковое распирающее усилие.

Величина бокового распирающего усилия без прижима листа составляет

$$T = (0,18 \div 0,35)P. \quad (1.2)$$

С прижимом

$$T = (0,1 \div 0,2)P. \quad (1.3)$$

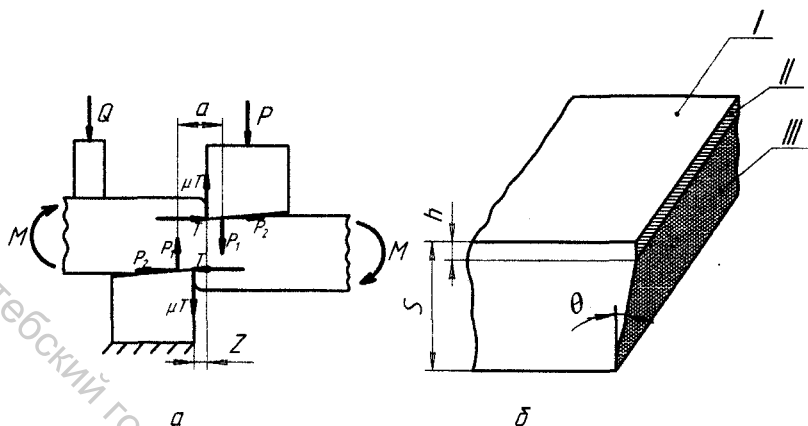


Рис. 1.1. Схема резки листового материала по незамкнутому контуру:

а – схема действия сил; б – отрезанная заготовка;

I – скругленная часть листа; II – поверхность пластического среза; III – поверхность скола

Для устранения возможности поворота листа в процессе отрезки предусмотрено прижимное устройство. Величина усилия прижима ориентировочно равна

$$Q = (0,3 \div 0,4)P. \quad (1.4)$$

Боковая поверхность отрезанной заготовки имеет характерные зоны (рис. 1.1, б). Зона I представляет собой скругленную часть листа. Необратимое скругление произошло в результате того, что слои металла, граничащие с поверхностью разделения, охвачены пластической деформацией, которая изменяется от нулевого значения на внешней границе слоя до максимума у поверхности разделения. Зона II – это поверхность пластического среза, сглаженная силами трения. Зона III представляет собой поверхность скола, образующуюся в результате возникновения и развития трещин скалывания. Трещины скалывания направлены под определенным углом  $\theta$  к плоскости листа, называемым *естественным углом скола*, значение которого зависит от физико-механических свойств металла. Этот угол составляет  $4 - 6^\circ$ .

В зависимости от зазора между ножами Z, глубины проникновения ножа в толщу металла h трещины скалывания от кромок верхнего и нижнего ножей могут

пройти параллельно или навстречу друг другу. В последнем случае зазор между ними будет оптимальным, так как поверхность скола получается наиболее гладкой.

Оптимальный зазор может быть определен из соотношения

$$Z_{\text{опт}} = (S - h) \operatorname{tg} \Theta, \quad (1.5)$$

где  $S$  – толщина материала;

$h$  – толщина материала;

$\Theta$  – угол естественного скола.

Практически оптимальный зазор определяют на основании экспериментов.

Для мягкой стали оптимальный зазор изменяется в зависимости от толщины металла от 0,02 (при толщине металла 0,25 мм) до 0,82 мм (при толщине металла 12,5 мм). Ориентировочно можно считать, что при толщине металла  $S \leq 4$  мм  $Z_{\text{опт}} = (0,03 \div 0,06)$  мм.

Резка может осуществляться на ножницах с параллельным расположением ножей, наклонным (гильотинных), дисковых, вибрационных, а также в штампах. Различные способы резки приведены в таблице 1.3.

Усилие резания для ножниц с параллельными ножами равно

$$P = LS\sigma_{\text{ср}}, \quad (1.6)$$

для ножниц с наклонными ножами

$$P = 0,5 \frac{S^2}{\operatorname{tg} \varphi} \sigma_{\text{ср}}, \quad (1.7)$$

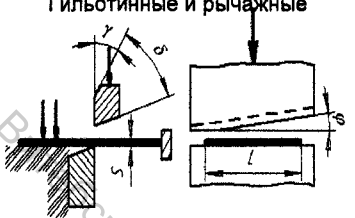
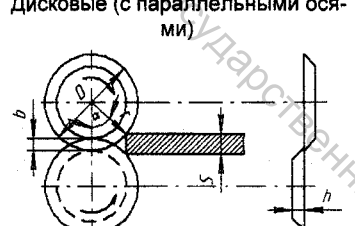
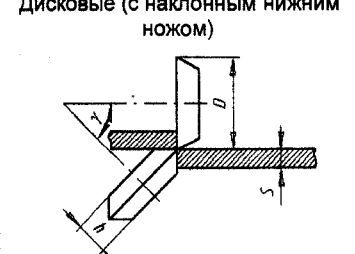
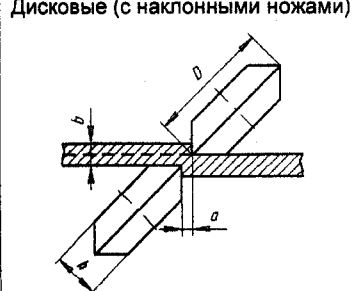
для дисковых ножниц

$$P = 0,5 \frac{h_n S}{\operatorname{tg} \alpha} \sigma_{\text{ср}}, \quad (1.8)$$

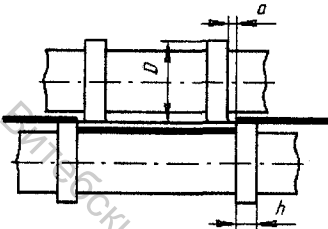
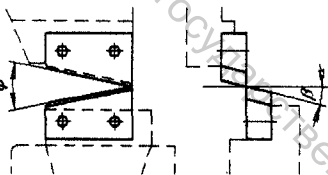
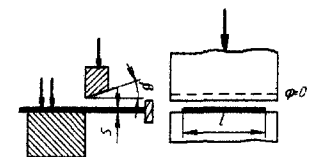
где  $L$  – длина реза;  $\varphi$  – угол створа ножниц;  $\sigma_{\text{ср}}$  – сопротивление срезу;  $h_n$  – глубина вдавливания ножей к моменту скалывания;  $\alpha$  – угол захвата дисковых ножниц (таблица 1.3).

Таблица 1.3

Различные способы резки листовых материалов

| Тип ножниц и схема                                                                                                           | Рабочие элементы режущих инструментов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Основное применение                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Гильотинные и рычажные</p>                | <p>Угол створа:<br/>         Для гильотинных ножниц <math>\varphi = 2 + 6^\circ</math>;<br/>         для рычажных ножниц <math>\varphi = 7 + 12^\circ</math>;<br/>         Угол резания <math>\delta = 75 + 85^\circ</math><br/>         Задний угол <math>\gamma = 2 + 3^\circ</math><br/>         Для упрощения заточки ножей допускается <math>\delta = 90^\circ</math> и <math>\gamma = 0</math>.<br/>         Зазор между ножами от 0,05 до 0,2 мм</p> | <p>Резка листовых материалов на полосы или штучные заготовки. Толщина разрезаемого материала до 40 мм (в зависимости от типа ножниц)</p>                                                         |
| <p>Дисковые (с параллельными осями)</p>      | <p>Угол захвата <math>\alpha &lt; 14^\circ</math>.<br/>         Заход ножей <math>b = (0,2 + 0,3)S</math>.<br/>         Размеры ножей (дисков):<br/>         Для толстых материалов (<math>S &gt; 10</math> мм) <math>D = (25 + 30)S</math>,<br/> <math>h = 50 + 90</math> мм;<br/>         для тонких материалов (<math>S &lt; 3</math> мм) <math>D = (35 + 40)S</math>,<br/> <math>h = 20 + 25</math> мм</p>                                              | <p>Резка листов на полосы, а также резка круглых (дисковых заготовок) с выходом на край листа. Толщина разрезаемого материала до 30 мм (разные типы ножниц)</p>                                  |
| <p>Дисковые (с наклонным нижним ножом)</p>  | <p>Угол наклона <math>\gamma = 30 + 40^\circ</math>.<br/>         Размеры ножей (дисков):<br/>         Для толстых материалов (<math>S &gt; 10</math> мм) <math>D = 20S</math>,<br/> <math>h = 50 + 80</math> мм;<br/>         для тонких материалов (<math>S &lt; 3</math> мм) <math>D = 28S</math>,<br/> <math>h = 15 + 20</math> мм</p>                                                                                                                  | <p>Резка полос, круглых, дисковых и кольцевых заготовок. Толщина разрезаемого материала до 30 мм (разные типы ножниц)</p>                                                                        |
| <p>Дисковые (с наклонными ножами)</p>      | <p>Зазор <math>a \leq 0,2S</math>; зазор <math>b \leq 0,3S</math>.<br/>         Размеры ножей (дисков):<br/>         Для толстых материалов (<math>S &gt; 10</math> мм) <math>D = 12S</math>,<br/> <math>h = 40 + 60</math> мм;<br/>         для тонких материалов (<math>S &lt; 5</math> мм) <math>D = 20S</math>,<br/> <math>h = 10 + 15</math> мм</p>                                                                                                    | <p>Резка круглых, дисковых, кольцевых и криволинейных заготовок с малым радиусом, толщиной до 20 мм. Криволинейная поверхность задней режущей грани обеспечивает свободный поворот материала</p> |



| Тип ножниц и схема                                                                                                            | Рабочие элементы режущих инструментов                                                                                                                                                                                     | Основное применение                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Многодисковые (с параллельными осями)</p>  | <p>Угол резания <math>90^\circ</math>.<br/> Размеры ножей:<br/> <math>D = (40 + 125)S</math>, <math>h = 15 + 30</math> мм<br/> Перекрывание:<br/> <math>B = \pm 0,5S</math>;<br/> Зазор <math>a = (0,1 + 0,2)S</math></p> | <p>Для одновременной резки нескольких полос, а также обрезки полос и ленты по ширине. Толщина материала до 10 мм (разные типы ножниц)</p> |
| <p>Вибрационные</p>                           | <p>Частота ходов 33–416 сек<sup>-1</sup><br/> Ход ножа 2 – 3 мм<br/> Передний угол <math>\beta = 6 + 7^\circ</math><br/> Угол створа <math>\varphi = 24 + 30^\circ</math></p>                                             | <p>Резка криволинейных заготовок по разметке или шаблонам с малым радиусом (до 15 мм). Толщина материала до 10 мм</p>                     |
| <p>Отрезные штампы</p>                        | <p>Передний угол <math>\beta = 2 + 3^\circ</math><br/> Угол створа <math>\varphi = 0^\circ</math></p>                                                                                                                     | <p>Резка полос на штучные заготовки</p>                                                                                                   |

### 1.3. Резание при вырубке и пробивке

Процесс резания при вырубке и пробивке аналогичен процессу резания на ножницах и также состоит из трех стадий: упругой, пластической и скалывания. Вдавливание пуансона происходит не по всей торцевой поверхности, лишь по кольцевому пояску шириной  $b$  (рис. 1.2). Вдавливание наблюдается и со стороны матрицы. Отпечатки от локализованного вдавливания пуансона и матрицы остаются на вырубленной детали и отходе в виде смятой полоски вдоль контура резания.

В процессе локализованного вдавливания пуансона в заготовку между кромками пуансона и матрицы возникает пара сил резания, вызывающая круговой изгибающий момент, под действием которого заготовка получает пространственный изгиб (выпучивание). В наружной (выпуклой) стороне заготовки возникает

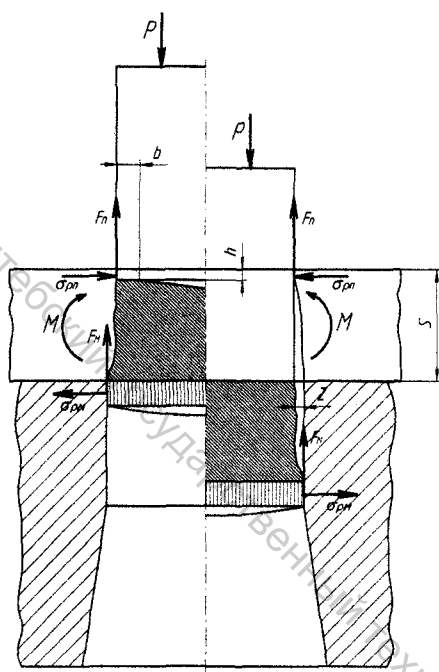


Рис. 1.2. Схема процесса вырубki и пробивки  $h = (0,25 \div 0,6)S$ . (1.9)

Поверхность разделения состоит из блестящего пояска (зона среза) и шероховатой части (зона скалывания). Угол наклона скалывающих трещин зависит от свойств материала и составляет  $3 - 15^\circ$ . Поэтому поверхность среза у вырубленной детали или пробитого отверстия имеет форму конуса.

Металлографические исследования макро- и микроструктуры вырубленных деталей показывают, что металл в зоне разделения претерпевает значительные структурные изменения и наклепывается. Глубина наклепанного слоя зависит от толщины материала, его свойств, величины зазора, качества режущих кромок, а также от скорости вырубki.

Усилие резания на протяжении рабочего хода изменяется, и максимальное значение соответствует окончанию стадии пластического деформирования.

напряженное состояние двухосного растяжения, а на внутренней стороне – состояние двухосного сжатия.

В этой стадии величина напряжений в матрице ниже предела упругости. При дальнейшем деформировании, т.е. погружении пуансона в материал, упругие деформации переходят в пластические, сопровождающиеся разрушением поверхностных слоев. Стадия пластической деформации переходит в стадию сдвига с образованием скалывающих трещин. Величина погружения пуансона до появления скалывающих трещин  $h$  составляет

$$P_{\max} = 0,58 \sigma_b LS, \quad (1.10)$$

где  $\sigma_b$  – предел прочности,  $L$  – периметр реза,  $S$  – толщина.

При вырубке деталь (или заготовка) остается в матрице, а отход плотно охватывает пуансон. В результате упругих деформаций возникают контактные напряжения  $\sigma_{pm}$  и  $\sigma_{pn}$ , которые при проталкивании детали сквозь матрицу и съеме отхода с пуансона вызывают возникновение сил трения.

В связи с этим при рабочем ходе пуансона необходимо преодолеть не только сопротивление вырубке-пробивке  $P_{\max}$ , но и сопротивление сил трения  $F_m$ , возникающее при перемещении детали относительно матрицы, а также сопротивление сил трения  $F_n$  на контактной поверхности пуансона и отхода металла. Сумму сил  $F_m$  и  $F_n$  называют *усилием проталкивания*  $P_{пр} = F_m + F_n$ , а силу  $F_n$  – *усилием снятия*  $P_{сн} = F_n$ .

На усилие проталкивания и съема существенно влияют ширина перемычки между соседними отдельными контурами; форма и размеры штампуемого контура; зазор между пуансоном и матрицей; возможность перекоса отхода металла относительно пуансона и пр. Учет влияния всех факторов вызывает определенные трудности, поэтому усилие проталкивания и снятия определяют по эмпирическим формулам

$$P_{пр} = \kappa_{пр} P(H/S); \quad (1.11)$$

$$P_{сн} = \kappa_{сн} P, \quad (1.12)$$

где  $\kappa_{пр}$  и  $\kappa_{сн}$  – коэффициенты проталкивания и съема.

В зависимости от толщины металла, числа одновременно штампуемых деталей, типа штампа  $\kappa_{пр}=0,05+0,14$ ;  $\kappa_{сн}=0,02+0,20$ .

#### 1.4. Чистовая вырубка и пробивка

Получение качественной поверхности среза ( $Ra = 0,5 - 1$  мкм) с точностью размеров, соответствующих 8 – 11 качеству, может быть достигнуто чистовой вырубкой и зачисткой.

Сущность способов чистового разделения заключается в создании дополнительного давления на заготовку и применение схемы напряженного сжатия материала в зоне разделения. Дополнительное давление, достигающее в зоне разделения предела прочности, обеспечивает пластическое течение металла в условиях объемного сжатия. Вследствие этого отсутствует хрупкое разрушение, ска-

рывающие трещины не появляются, а срез получается ровным при высоком качестве поверхности. На рис. 1.3 приведены различные способы реализации чистовых операций.

При вырубке прижим 1 (рис. 1.3, а) действует на полосу, а прижим 2 на вырубаемую деталь. Чтобы воспрепятствовать перемещению материала, на торцевой поверхности прижима 1 предусмотрена зубчатая насечка. Давление прижима 2 создается за счет использования буферного устройства 3.

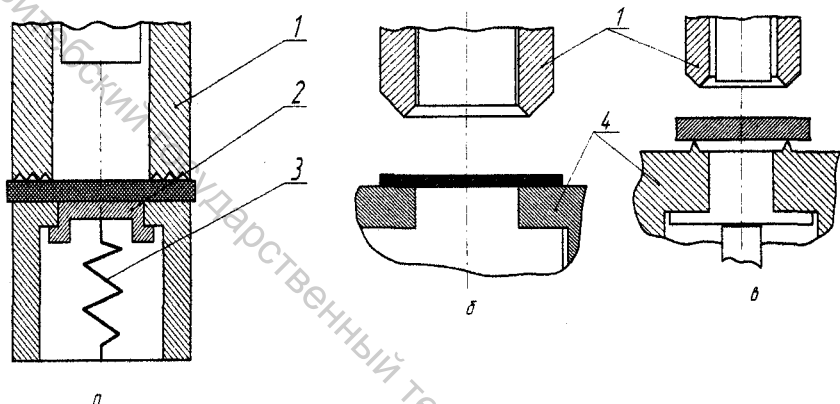


Рис. 1.3. Способы чистового отделения заготовок с применением локального сжатия

а – плоское сжатие по поверхностям детали и отхода; б – одностороннее сжатие кольцевой насечкой; в – двустороннее сжатие кольцевыми насечками; 1 – прижим верхний; 2 – прижим нижний; 3 – буферное устройство; 4 – матрица

При таком способе вырубки ширина перемычки должна быть в 2,5 - 3 раза больше, чем при обычной вырубке, т.е. не менее 3S. Величина давления на перемычках наружного и внутреннего прижимов должна равняться пределу прочности.

Этот способ ограничивается толщиной и габаритными размерами деталей. Толщина детали должна быть больше 3 мм, но меньше 12 мм; размеры в плане при вырубке 10S; диаметры пробиваемых отверстий (0,3 – 1,0)S; расстояние между отверстиями (перемычка) 0,8S. Необходимо указать на ряд трудностей в создании давления на материал.

Разновидностью рассмотренного способа является чистовая вырубка с поперечной осадкой, которая создается за счет кольцевого острого ребра. При тонком материале такие ребра выполняются только на прижиме (рис. 1.3, б), а при толстом – на прижиме и матрице (рис. 1.3, в).

При вдавливании ребра происходит перемещение материала заготовки к режущим кромкам, а в зоне резания возникает объемное сжатие. Заготовки, изготавливаемые чистовой вырубкой, отличаются сложной формой контура (рис. 1.4).

Изготавливать клиновые ребра такой же конфигурации сложно и не всегда целесообразно. Поэтому клиновые ребра выполняются по упрощенному контуру.

При этом соблюдается условие: если ширина или впадина на детали меньше  $(3-4)S$ , то клиновое ребро обходит их; если ширина или впадина паза больше  $4S$ , то клиновое ребро входит внутрь паза.

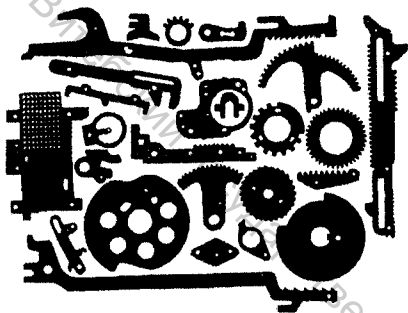


Рис. 1.4. Типы заготовок, изготавливаемых чистовой вырубкой

Полное усилие пресса, необходимое для чистовой вырубки-пробивки с предварительным сжатием заготовки, в 1,6 – 2,25 раза больше, чем при вырубке-пробивке без предварительного сжатия.

Кроме рассмотренного способа чистовой вырубки и пробивки с предварительным локальным сжатием заготовки, существуют и другие способы, а именно: чистовая вырубка на матрице со скругленными кромками (рис. 1.5, а) и чистовая вырубка пуансоном больших размеров, чем матрица (рис. 1.5, б).

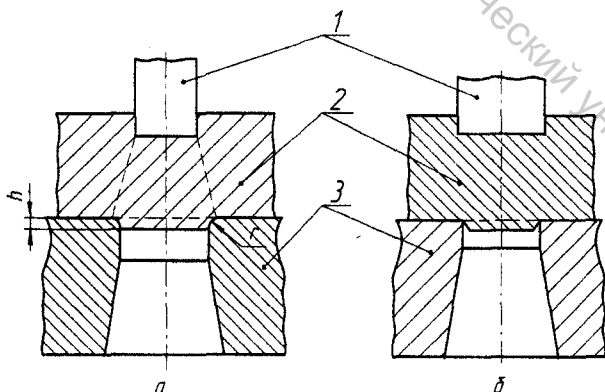


Рис. 1.5. Схемы чистовой вырубки: а - на матрице со скругленными кромками; б - пуансоном больших размеров, чем матрица; 1 - пуансоны; 2 - материал заготовки; 3 - матрицы

Сущность этих способов, как и чистовой вырубки и пробивки с локальным сжатием заготовки, заключается в преднамеренном создании напряжений сжатия в очаге пластической деформации, вызывающих повышение пластичности материала заготовки, в сочетании с использованием контактных сил трения для сглаживания боковой поверхности изделия.

В случае реализации способа чистовой вырубки на матрице со скругленными кромками пуансоны имеют обычную форму, кромки матрицы на высоте  $h=(1-1,5)S$  имеют скругления радиусом  $r=Z/2$ . Зазор между матрицей и пуансоном назначается до 0,01 мм. Способ применяется для деталей из мягкой стали, цветных металлов при условии, что контур этих деталей имеет плавные очертания.

Сущность вырубки пуансоном, сечение которого больше отверстия матрицы (рис. 1.5, б), состоит в том, что в результате давления пуансона материал течет по кромкам матрицы до тех пор, пока между режущими кромками пуансона и матрицы не образуются трещины скалывания. По мере дальнейшего погружения пуансона в материал появляются трещины скалывания, деталь отделяется от полосы и со значительным усилием (вследствие обратного конуса) проталкивается через матрицу. Обычно размер пуансона выполняется больше размера матрицы на  $(0,1...0,2)S$ . При закругленной форме детали припуск пуансона выполняется равномерным, если же деталь имеет углы и выступы, припуск у наружных углов принимается в два раза больше, т.е. от 0,2 до 0,4S, а у внутренних углов — в два раза меньше — от 0,5 до 0,1S. Для получения большей чистоты поверхности среза на режущих кромках матрицы выполняется небольшая фаска. В нижнем рабочем положении пуансон не должен доходить до поверхности матрицы на 0,1...0,2 мм. Деталь после выхода из штампа увеличивается в размерах на 0,02...0,05 мм. Шероховатость поверхности среза достигает  $Ra\ 0,4$ .

Зачистку по наружному контуру снятием припуска применяют для деталей с периметром до 300 мм, толщиной до 10 мм в случаях, когда требуется повышенное качество поверхности среза; когда контур детали или его элемент является базой для дальнейшего выполнения ряда операций с высокой точностью; когда требуется повышенная точность наружного контура на штампуемых деталях. Зачистка позволяет получать детали небольших размеров с точностью IT6...IT9.

Применяются следующие способы зачистки штамповки:

- зачистка наружного контура срезанием припуска;

- зачистка обжатием в матрице.

Зачистка наружного контура срезанием припуска является наиболее распространенной операцией, широко применяется в производстве изделий точной механики. Достигаемая точность изделий соответствует IT7 или даже IT6.

Процесс зачистки состоит в том, что предварительно вырезанная и выправленная заготовка, уложенная в фиксатор штампа, под действием пуансона вдавливается в матрицу, режущая грань которой врезается в металл, сминая его, и постепенно отделяет от слоя первый, второй и т.д. элементы, которые перемещаются в радиальном направлении (рис. 1.6, а).

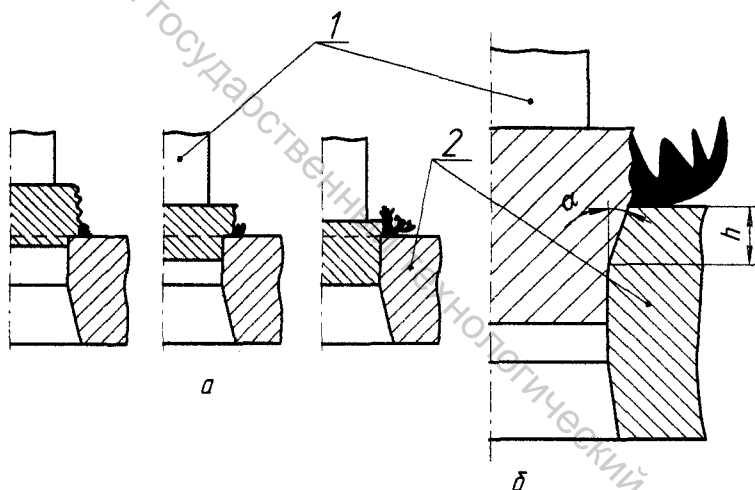


Рис. 1.6. Последовательность зачистки срезанием припуска (а) и обжатием в матрице (б); 1 – пуансоны; 2 – матрицы

В конце зачистки из-за отсутствия противодействия со стороны верхнего слоя стружки последний элемент скалывается, что приводит к неудовлетворительной поверхности среза и к образованию вырывов в теле детали. Величина вырывов при прочих равных условиях будет тем больше, чем больше припуск на зачистку. Поэтому у большинства зачищенных деталей в верхней плоскости имеется шероховатый пояс. Рассмотренный процесс зачистки используется для обработки мягких материалов: латуни, алюминия.

При зачистке стальных деталей следует применять матрицу с заваленной кромкой (рис. 1.6, б). В таких матрицах в верхней плоскости происходит снятие стружки, а на скошенной кромке—обжatie (коническая часть). Угол развала  $\alpha$  и высота  $h$ , на которой матрица имеет коническую поверхность, зависят от толщины детали.

Исходя из требований шероховатости поверхности и точности размеров детали, по контуру производят однократную или многократную зачистку. Однократную зачистку следует применять для деталей с плавным очертанием наружного контура при условии, что толщина зачищаемой детали меньше 5 мм, а при использовании матриц с заваленной кромкой - и для деталей больших толщин.

Многократную зачистку следует применять для всех деталей толщиной более 5 мм, а если по условиям эксплуатации детали утяжки недопустимы, то для всех деталей, независимо от их толщины.

Высокое качество поверхности с ничтожным сколом последнего элемента достигается путем вибрационной зачистки. Частоты колебаний 13...25 Гц, амплитуда каждого колебания от 0,3 до 0,6 мм. При этом способе зачистки пуансон не доходит до поверхности матрицы на 0,05... 0,1 мм, а зачищаемая деталь проталкивается через матрицу следующей деталью.

Пуансон не подгоняется по матрице, благодаря чему штампы значительно удешевляются. Шероховатость поверхности при вибрационной зачистке достигает  $Ra0,4$ . Вибрационная зачистка обеспечивает более высокое качество поверхности, чем две операции обычной зачистки. Зачистку наружных поверхностей обжатием применяют для плоских мелких деталей сложной конфигурации толщиной 3 - 7 мм.

Зачистка наружной поверхности обжатием с подчеканкой отличается от

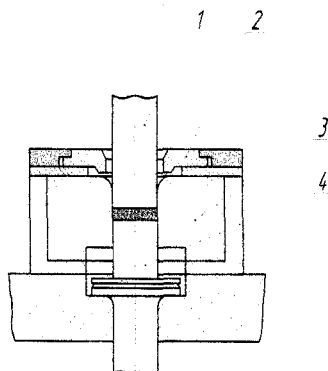


Рис. 1.7. Схема зачистки обжатием с подчеканкой:

- 1 - пуансон; 2 - фиксатор; 3 - матрица; 4 - направляющая



обычного процесса зачистки тем, что не происходит отделения материала в стружку. Процессы зачистки и чеканки осуществляются последовательно. Предварительно вырезанная заготовка продавливается пуансоном 1 через матрицу 3, имеющую рабочую поверхность с закругленными кромками (рис. 1.7). В конце рабочего хода пресса происходит объемное сжатие заготовки с образованием выпукло-вогнутого профиля. Так осуществляется чеканка монет, медалей, знаков. В начале обработки заготовку укладывают в фиксатор 2, который делают выдвижным или откидным. Применение подвижного фиксатора облегчает удаление детали.

### 1.5. Расчет исполнительных размеров матриц и пуансонов

Размеры изделия, получаемого вырубкой, соответствуют размерам рабочего отверстия матрицы. Изнашивание матрицы приводит к увеличению ее рабочего отверстия. Поэтому исполнительные размеры рабочего отверстия матрицы для вырубки должны быть наименьшими предельными.

Если штампуемое изделие имеет форму круга и допуски на его диаметр назначены в системе отверстия, то исполнительный диаметр рабочего отверстия матрицы определяется как разность между номинальным диаметром изделия и допуском на этот диаметр:

$$D_m = (D_n - \Delta)^{+\delta_m}, \quad (1.13)$$

где  $D_n$  – номинальный диаметр штампуемого изделия;  $\Delta$  – допуск на диаметр изделия;  $\delta_m$  – допуск на размер матрицы.

Рабочий (исполнительный) диаметр пуансона для вырубки в данном случае будет меньше диаметра матрицы на значение зазора ( $z$ ) между ними:

$$D_n = (D_m - z)_{-\delta_n}, \quad (1.14)$$

где  $\delta_n$  – допуск на размер пуансона.

Диаметр отверстия, получаемого пробивкой, соответствует диаметру пуансона. Изнашивание пуансона приводит к уменьшению его диаметра. Поэтому исполнительный диаметр пуансона должен быть наибольшим предельным.

Если допуски на штампуемое изделие назначены в системе отверстия, то диаметр пуансона определяется как сумма номинального диаметра отверстия и допуска на этот диаметр:

$$D_n = (D_n + \Delta)_{-\delta_n} \quad (1.15)$$

Рабочий, исполнительный диаметр матрицы для пробивки будет больше диаметра пуансона на значение зазора между ними:  $D_m = D_n + z$  или, учитывая (1.15),

$$D_m = (D_n + \Delta + z)^{+\delta_m} \quad (1.16)$$

Приведенные формулы (1.13) – (1.16) для определения исполнительных размеров пуансонов и матриц применимы в том случае, когда толщина штампуемого материала сравнительно невелика (до 1 – 2 мм), так как при этом условии боковая поверхность отдельной части металла может считаться приблизительно перпендикулярной плоскости листа.

При штамповке более толстого металла (свыше 2 мм) необходимо принимать во внимание конусность боковой поверхности отдельной части металла, которая образуется вследствие того, что скалывающиеся трещины направлены под определенным углом к образующей.

Поэтому для устранения возможности выхода размеров штампуемой детали за предельные, поле допуска на диаметр детали искусственно уменьшается. Уменьшенный допуск  $\Delta'$  принимается равным 0,6 – 0,8 номинального допуска  $\Delta$ . В этом случае формулы для определения исполнительных размеров пуансонов и матриц имеют вид:

для вырубки

$$D_m = [D_n - (0,6 \div 0,8)\Delta]^{+\delta_m} \quad (1.17)$$

$$D_n = [D_n - (0,6 \div 0,8)\Delta - z]_{-\delta_n} \quad (1.18)$$

для пробивки

$$D_n = [D_n + (0,6 \div 0,8)\Delta]_{-\delta_n} \quad (1.19)$$

$$D_m = [D_n + (0,6 \div 0,8)z]^{+\delta_m} \quad (1.20)$$

Допуск на рабочие размеры пуансонов и матриц  $\delta_m$  и  $\delta_n$  принимают равным 25 – 35 % от допуска на соответствующий размер штампуемой детали. Допуски на размеры инструмента назначают по определенным качествам точности:

при толщине штампуемого металла до 3 мм – по 8-му качеству и при толщине металла свыше 3 мм – по 10-му качеству.

### **1.6. Раскрой листового материала**

*Раскрой* – это поиск наиболее эффективного размещения заготовок в полосе или ленте относительно друг друга, а также кромок листа или полосы. Мерой эффективности раскроя является коэффициент использования металла  $K_u$ , представляющий собой отношение массы детали к норме расхода металла на ее изготовление, и коэффициент раскроя  $K_{ра}$ , равный отношению массы деталей, полученных из одного листа к массе листа. Если коэффициент раскроя  $K_{ра}$  зависит от формы внешнего контура деталей и их взаимного расположения, то коэффициент использования металла  $K_u$  зависит еще и от наличия в детали отверстий. Коэффициент использования металла – главный показатель, определяющий как эффективность использования металла, так и технологичность конструкции детали.

Существуют три вида раскроя листового материала: с отходами, малоотходный и безотходный.

При раскрое с отходами заготовку получают вырубкой по замкнутому контуру. Между заготовками, а также между заготовками и кромкой полосы оставляют перемычки. Ширина перемычки зависит от толщины материала, механических свойств, длины прямолинейных участков, конструкции штампов. Ширину перемычек определяют по специальным таблицам.

Малоотходный раскрой характеризуется отсутствием боковых перемычек. При этом ширина полосы должна быть равна ширине заготовки.

Безотходный раскрой применяют при штамповке деталей, контур которых сопрягается друг с другом. При безотходном раскрое перемычки отсутствуют.

При малоотходном и безотходном раскрое происходит отрезка по незамкнутому контуру. Это приводит к снижению стойкости инструмента в связи с тем, что изгибающие моменты и распорные усилия взаимно не уравновешиваются. В результате пуансон штампа может смещаться, что неизбежно приведет к увеличению зазора с одной стороны и уменьшению с другой. Увеличение зазора приводит к образованию торцевого заусенца, а уменьшение зазора – к росту усилий на

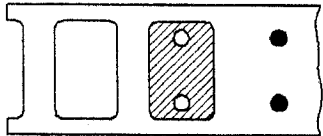
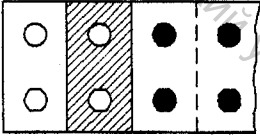
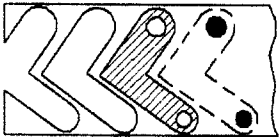
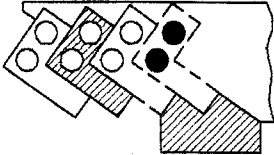
рабочих кромках пуансона и матрицы, и в результате изнашивание кромок происходит более интенсивно.

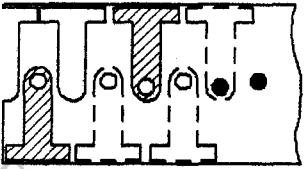
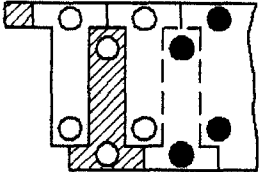
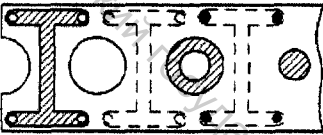
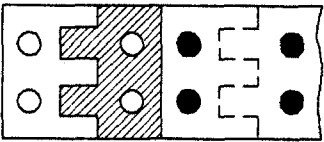
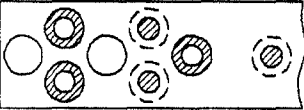
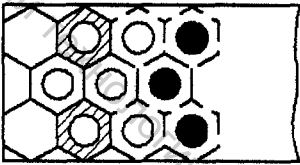
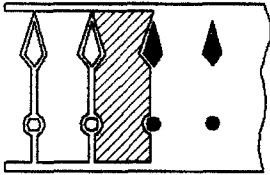
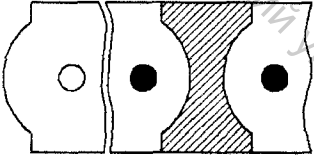
Различают шесть основных типов раскроя (табл. 1.4). Прямой раскрой применяют при штамповке деталей простой геометрической формы - прямоугольной, овальной; наклонный раскрой применяют при штамповке Г-образных заготовок или схожих; встречный раскрой - при штамповке Т-образных заготовок; комбинированный раскрой - при штамповке заготовок разной формы, но одинаковой толщины; многорядный раскрой - при штамповке мелких заготовок; раскрой с вырезкой перемычек применяется при штамповке узких заготовок.

Возможность применения многорядной штамповки мелких деталей определяется масштабом производства и экономической целесообразностью. Последняя устанавливается путем нахождения минимального количества деталей, при котором увеличение затрат на многорядные штампы покрывается экономией на себестоимости деталей.

Если условно принять стоимость однорядного штампа за единицу, то стоимость трехрядного штампа для деталей простой формы возрастает в 1,5 - 1,7 раза, а пятирядного штампа в 1,8 - 2,2 раза. Для деталей сложной формы стоимость штампов соответственно возрастает в 1,8 - 2,4 и 2,5 - 3,5 раза.

Таблица 1.4.  
Основные типы раскроя

| Тип раскроя и эскиз                                                                 |                                                                                     | Применение раскроя                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Прямой                                                                              |                                                                                     |                                                                                                                     |
|   |   | Для деталей простой геометрической формы (прямоугольной, круглой, квадратной)                                       |
| Наклонный                                                                           |                                                                                     |                                                                                                                     |
|  |  | Для деталей Г-образной или другой сложной конфигурации, которые при прямом расположении дают большие отходы металла |

| Встречный                                                                         |                                                                                    | Для деталей Т-, П-, Ш-образной конфигурации, которые при прямом и наклонном расположении дают большие отходы                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |   |                                                                                                                                                     |
| Комбинированный                                                                   |                                                                                    | Для двух различных деталей, одинаковых по толщине и марке металла, в крупносерийном и массовом производствах                                        |
|   |   |                                                                                                                                                     |
| Многорядный                                                                       |                                                                                    | Для деталей небольших размеров в крупносерийном и массовом производстве                                                                             |
|   |   |                                                                                                                                                     |
| С вырезкой перемычек                                                              |                                                                                    | Для мелких и узких деталей (часовые стрелки и подобные детали) или для последовательной вытяжки в ленте при крупносерийном и массовом производствах |
|  |  |                                                                                                                                                     |

### 1.7. Гибка листового материала

Удельный вес гибочных работ непрерывно увеличивается за счет новых принципов конструирования и технологии изготовления машин и приборов. Литые и кованые заготовки вытесняются штампосварными, изготавливаемыми из гнутых элементов; профильный прокат заменяется заготовками, получаемыми посредством гибки полосы или ленты; вырубка колец большого размера заменяется гибкой полос на ребро и т.д.

В зависимости от размеров и формы детали, профиля исходной заготовки, характера производства, гибка осуществляется на кривошипных, эксцентриковых, фрикционных, гидравлических прессах или на специальных гибочных и профилирующих станках. В машиностроении наиболее часто выполняют гибку в штампах, установленных на кривошипных прессах.

Гибка осуществляется в результате действия на заготовку сил  $P$  и  $Q$  со стороны пуансона и матрицы (рис. 1.8). Силы  $P$  и  $Q$  образуют изгибающий момент.

В процессе гибки внутренние слои заготовки сжимаются и укорачиваются в продольном направлении, а в поперечном — удлиняются.

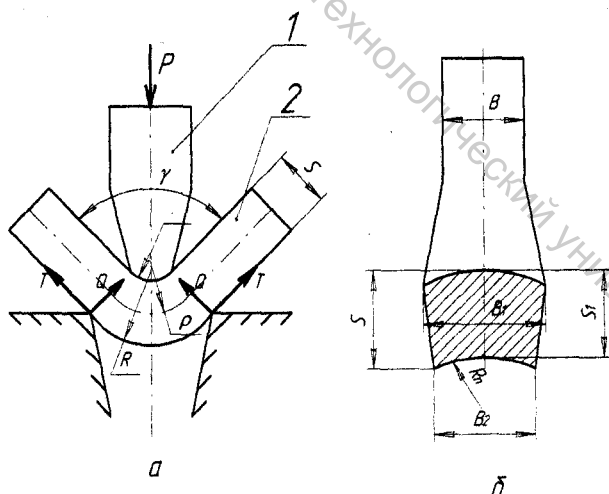


Рис. 1.8. Схема действия сил (а) и деформации заготовки (б) при изгибе  
1 — пуансон; 2 — матрица

Наружные слои – наоборот, растягиваются и удлиняются в продольном направлении и сжимаются в поперечном направлении. После гибки форма и размеры поперечного сечения заготовок изменяются. Изменения поперечного сечения заготовки тем больше, чем меньше радиус изгиба. Это происходит вследствие того, что пластическая деформация в окружном направлении в соответствии с условиями постоянства объема сопровождается пластическими деформациями обратного знака в одном или двух взаимно перпендикулярных направлениях: радиальном и аксиальном.

В результате гибки заготовок, имеющих соизмеримую ширину  $B$  относительно ширины  $S$ , сечение деформируется (рис. 1.8). Происходит некоторое увеличение ширины  $B_1$ , уменьшение ширины  $B_2$  и образование поперечной кривизны радиусом  $R_n$ . Если выпучивание сторон недопустимо, необходимо предусмотреть механическую обработку для устранения искажения формы.

Изменение толщины и ширины заготовки учитывается коэффициентами сужения  $\alpha$  и уширения  $\beta$ .

$$\alpha = \frac{S_1}{S}, \beta = \frac{B_{cp}}{B}, \quad (1.21)$$

где  $S$  и  $S_1$  – толщина заготовки до и после гибки;  $B$  – начальная ширина заготовки;  $B_{cp}$  – средняя ширина заготовки после гибки;

$$B_{cp} = \frac{B_1 + B_2}{2}, \quad (1.22)$$

где  $B_1$  и  $B_2$  – соответственно ширина заготовки по внутренней и наружной кромкам в месте изгиба.

Между растянутыми и сжатыми слоями находится нейтральный слой, который претерпевает изгиб, но не изменяет первоначальной длины. Нейтральный слой в зависимости от величины отношения  $r/S$  смещается в сторону внутренних слоев. Радиус кривизны нейтрального слоя заготовок прямоугольного сечения определяется по формуле

$$\rho = r - \chi S, \quad (1.23)$$

где  $r$  – внутренний радиус;  $\chi$  – коэффициент утонения, определяющий расстояние нейтрального слоя от внутреннего радиуса изгиба.

Таблица 1.5

Зависимость коэффициента утонения  $\chi$  от отношения  $r/S$ 

| $r/S$  | 0,1  | 0,25 | 0,3  | 0,5  | 0,8  | 1,0  | 1,5  | 2,0  | 3,0  | 6,0  |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\chi$ | 0,30 | 0,35 | 0,36 | 0,38 | 0,40 | 0,42 | 0,44 | 0,45 | 0,47 | 0,48 |

Для расчета длины заготовок (разверток) необходимо:

- разбить контур детали на элементы, представляющие собой отрезки прямой и части окружности;
- определить положение нейтрального слоя в зоне деформации, который сохраняет свою длину неизменной после гибки;
- просуммировать длины этих отрезков.

Длины прямых участков суммируются без изменения, а длины криволинейных участков - с учетом деформации материала и соответствующего смещения нейтрального слоя. Максимально допустимый радиус гибки, при котором изогнутость заготовки сохраняется, определяется по формуле:

$$r_{\max} = \varepsilon S / 2\sigma_T, \quad (1.24)$$

где  $\varepsilon$  - модуль упругости;  $\sigma_T$  - предел текучести.

Минимально допустимые радиусы гибки должны соответствовать пластичности материала и не допускать образования трещин. Минимальные радиусы гибки устанавливаются по предельно допустимым деформациям крайних волокон. Величину деформаций крайних волокон определяют по формулам, учитывающим утонение материала и смещение нейтрального слоя.

Для растянутого наружного слоя радиуса  $R$ :

$$\varepsilon_R = \frac{\frac{r}{S} + 1}{\frac{r}{S} + \frac{\alpha}{2}} - 1; \psi_R = 1 - \frac{\frac{r}{S} + \frac{\alpha}{2}}{\frac{r}{\alpha S} + 1}; \quad (1.25)$$

для сжатого внутреннего слоя радиуса  $r$ :

$$\varepsilon_r = \frac{\frac{r}{S} + \frac{\alpha}{2}}{\frac{r}{\alpha S}} - 1; \psi_r = 1 - \frac{\frac{r}{\alpha S}}{\frac{r}{S} + \frac{\alpha}{2}}; \quad (1.26)$$

где  $\varepsilon$  - полное относительное удлинение, тождественное наибольшему относительному удлинению в шейке образца при растяжении;

$\psi$  - относительное сужение поперечного сечения.



Процесс гибки сопровождается упругими деформациями, величина которых пропорциональна напряжениям. Упругие деформации вызывают изменение формы и размеров заготовки: радиуса кривизны и угла между прямолинейными участками заготовки. Это объясняется тем, что при разгрузке слои заготовки, находящиеся в зоне растяжения, вследствие упругой деформации укорачиваются, а слои, находящиеся в зоне сжатия, удлиняются. Разноименные упругие деформации в зонах растяжения и сжатия вызывают поворот поперечных сечений заготовки на угол пружинения  $\Delta\gamma$ , в результате чего происходит изменение радиуса кривизны и угла изгиба.

Величина пружинения при гибке зависит от ряда факторов, основными из которых являются: механические свойства и толщина материала заготовки, радиус гибки, форма детали, тип штампа, способ гибки и др. Чем больше предел текучести материала, модуль упругости, отношение  $r/S$  и меньше толщина, тем больше пружинение при прочих равных условиях. Многообразие форм деталей и факторов, оказывающих влияние на величину пружинения, исключает возможность создания расчетных формул для всех случаев гибки. Пружинение обычно определяют на основе опытных данных с последующей доводкой размеров рабочих частей штампа.

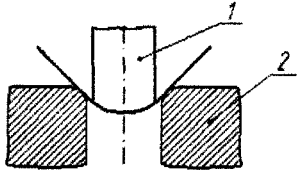
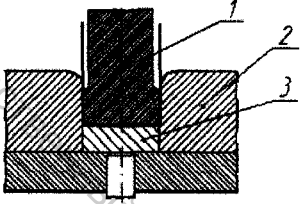
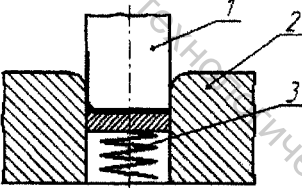
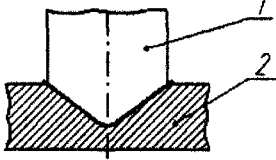
### **1.8. Силовые параметры гибки**

Схемы распределения напряжений, построенные методом теории пластических деформаций с учетом реальных условий гибки, имеют максимум сжимающих напряжений вблизи нейтрального слоя. Это происходит вследствие противоположного влияния радиальных сжимающих напряжений на величину тангенциальных напряжений в сжатой и растянутой зонах сечения, что приводит к разному характеру деформаций сдвига в этих зонах. В сжатой зоне радиальные напряжения сжатия противодействуют деформациям сдвига, которые вследствие этого могут быть осуществлены лишь при большой величине тангенциальных сжимающих напряжений. В растянутой зоне сечения радиальные напряжения, наоборот, способствуют осуществлению сдвига, которые происходят при меньшей величине тангенциальных растягивающих напряжений.

Определение деформирующего усилия, необходимого для гибки, представляет определенные трудности, вследствие чего данный вопрос может быть решен лишь приближенно. Это объясняется тем, что усилие гибки зависит от большого числа факторов, к которым относятся: форма и размеры поперечного сечения заготовки; характеристики механических свойств материала заготовки; расстояние между опорами; радиусы скругления пуансона и матрицы; условия контактного трения и т.д. Усилие гибки складывается из усилия гибки и усилия правки (калибровки) материала. Для практических целей представляет интерес определение усилия гибки на первой и заключительной стадиях (табл. 1.6).

Таблица 1.6.

## Формулы для определения усилий гибки

| Способ гибки.                                               | Схема гибки.                                                                       | Усилие гибки.                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Одноугловая и полукруглая свободная гибка без калибровки.   |   | $P = \frac{BS^2}{l} \sigma_B n = BS \sigma_B k_1$                                             |
| Двухугловая гибка с прижимом: без калибровки, с калибровкой |   | $P = 2BS \sigma_B k_2 + P_{np} \approx 2,5BS \sigma_B k_2$ $P_k \approx (3+4)BS \sigma_B k_2$ |
| Одноугловая односторонняя с прижимом (без калибровки)       |   | $P = BS \sigma_B k_2 + P_{np} \approx 1,25BS \sigma_B k_2$                                    |
| Одноугловая гибка: без калибровки, с калибровкой            |  | $P \approx \frac{BS^2}{r+S} \sigma_B$ $P_k = pF$                                              |

Обозначения: 1- пуансон; 2 – матрица; 3 – прижим.  
 $P_{np}$  – усилие прижима, составляющее  $(0,25 + 0,3)P$ ;  $P_k$  – усилие калибровки.  
 $B$  – ширина полосы (вдоль линии изгиба).  
 $l$  – расстояние между опорами при свободной гибке.  
 $n = 1,8$  – коэффициент, характеризующий влияние упрочнения.  
 $p$  – давление калибровки (правки).  
 $F$  – площадь калибруемой заготовки (под пуансоном).  
 $k_1, k_2$  – коэффициенты для свободной и двухугловой гибки.  
 $\sigma_B$  – предел прочности.

### 1.9. Профилирование

Под общим термином *профилирование* подразумевается получение из листовых заготовок жестких профилей большой длины и разнообразной формы. Профилирование осуществляется двумя основными способами: в штампах на специальных гибочных прессах или на профилировочных машинах (рис. 1.9).

На листогибочных прессах профили простой формы получают в штампах однопереходной гибкой, а профили сложной формы – в нескольких штампах многопереходной гибки (рис. 1.9, а). Число переходов равно числу перегибов на детали. При многопереходной гибке обычно используют универсальные штампы. Пуансоны универсального штампа отличаются друг от друга радиусами и формой рабочей части.

Пуансоны бывают прямые и изогнутые. Прямые гибочные пуансоны обычно применяют на первых операциях гибки высоких и узких профилей, а также на вторых и последующих гибочных операциях при гибке уголков и широких деталей коробчатого типа. Изогнутые пуансоны применяют на вторых и последующих операциях при гибке высоких и узких деталей коробчатого типа. Радиус рабочей части пуансона назначается равным внутреннему радиусу изгибаемого профиля и колеблется в пределах 1...7 мм. Матрицы в зависимости от рабочей части бывают с прямым, угловым или фасонным пазом. Первые более универсальные, а вторые имеют больший срок службы.

Профилирование на роликовых станках используется для открытых, полузакрытых и закрытых профилей. Сущность процесса профилирования заключается в постепенном изменении сечения плоской ленты на заданный профиль при ее последовательном перемещении через несколько пар фасонных роликов, расположенных последовательно друг за другом в одной плоскости и вращающихся с одинаковой скоростью (рис. 1.9, б).

Образующая роликов соответствует контуру того сечения, который желательно придать заготовке. Образующие каждой пары роликов имеют сопряженную конфигурацию и в диаметральном сечении напоминают пуансон и матрицу гибочного штампа.

При профилировании лента проскальзывает между роликами. Проскальзывание и возможность его регулирования являются необходимым условием, благодаря которому профиль может формироваться одновременно в нескольких парах роликов. Проскальзывание регулируется изменением расстояния между роликами.

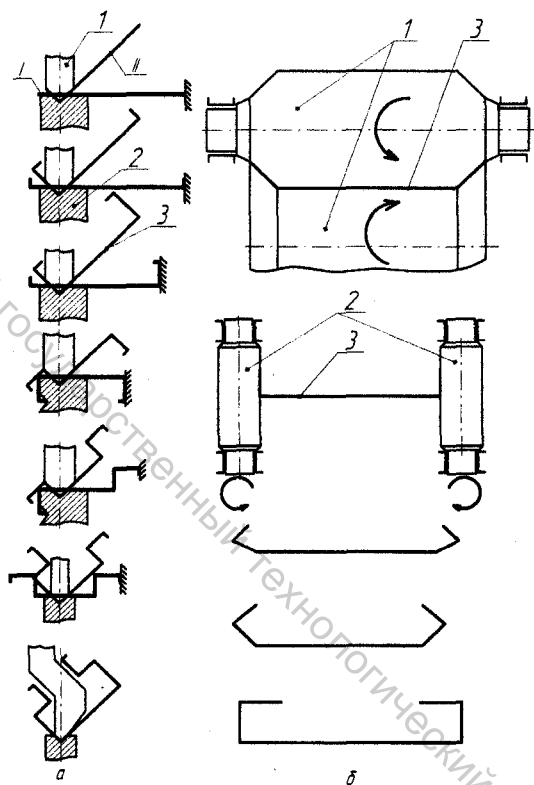


Рис. 1.9. Технологические схемы профилирования

а – схемы многопереходной гибки: 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – заготовка; I, II – заготовка соответственно до и после гибки

б – схемы профилирования на роликовых станках: 1 – основные ролики; 2 – вспомогательные ролики; 3 – профиль заготовки

Профилировочные станки имеют основные и вспомогательные ролики, а также направляющие устройства. Основные ролики вращаются вокруг горизонтально расположенных осей, а вспомогательные - вокруг вертикально распо-

женных осей. Вспомогательные ролики служат для получения дополнительных перегибов, которые не могут быть выполнены на основных роликах.

Применение гнутых профилей из листового или полосового материала взамен профилей, полученных непосредственно горячей прокаткой, позволяет существенно снизить массу изготавливаемых деталей и сборочных единиц. Поперечные сечения гнутых профилей представлены на рис. 1.10. Область применения того или иного способа изготовления гнутых профилей зависит от формы, размеров, толщины исходного листа и масштаба производства.

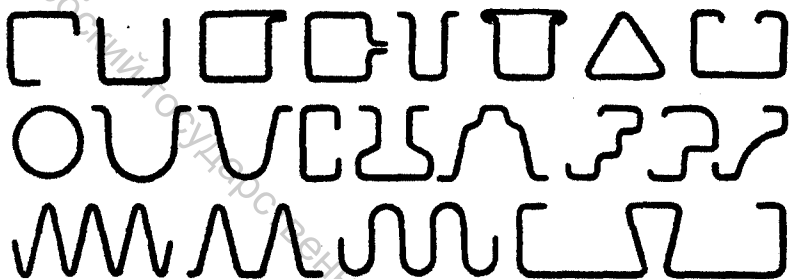


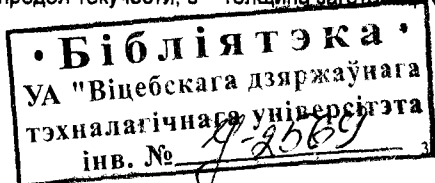
Рис. 1.10. Поперечные сечения гнутых профилей

### 1.10. Гибка с растяжением и сжатием

Сущность гибки с растяжением заключается в том, что, кроме внешнего изгибающего момента, к заготовке дополнительно прикладывают продольные растягивающие силы, которые уменьшают изгибающий момент (рис. 1.11, а). Точность размеров изогнутой детали, зависящая от ее упругих деформаций, повышается пропорционально уменьшению изгибающего момента. Указанную закономерность можно установить с помощью формулы, функционально связывающей изгибающий момент  $M$  и продольную растягивающую силу  $N$  применительно к изгибу заготовки единичной ширины:

$$M = \sigma_T \left( \frac{s^2}{4} - \frac{N^2}{4\sigma_T^2} \right), \quad (1.27)$$

где  $M$  – изгибающий момент;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $s$  – толщина заготовки;  $N$  – продольная сила



Анализ приведенной формулы показывает, что при увеличении продольной силы  $N$  внешний изгибающий момент  $M$  уменьшается. Схема гибки с продольным растяжением показана на рис. 1.11, а.

С уменьшением  $M$  уменьшаются и упругие деформации заготовки; при нулевом значении изгибающего момента ( $M = 0$ ) все слои заготовки будут только растянуты. В этом случае при разгрузке возникают только линейные деформации, угловые деформации практически отсутствуют, т. е. точность размеров изогнутой детали существенно возрастает.

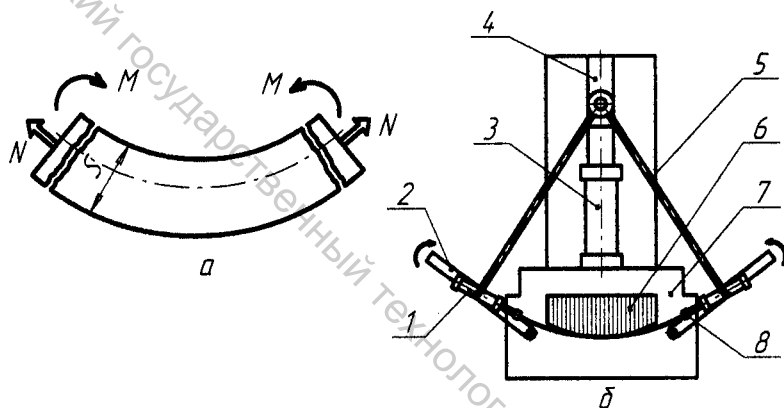


Рис. 1.11. Гибка с продольным растяжением:

а – схема действия сил; б – схема установки: 1 – гидроцилиндр растяжения; 2 – кронштейн поворотный; 3 – гидроцилиндр поворота кронштейнов; 4 – направляющая; 5 – тяга; 6 – шаблон; 7 – шток; 8 – зажим

В серийном и мелкосерийном производстве, например в авиационной промышленности, гибку с продольным растяжением применяют при изготовлении крупных и средних пологих, дугообразных деталей из тонкостенных алюминиевых и дюралюминиевых прессованных заготовок (шпангоуты, пояса нервюр, спрингеры и пр.). Гибку с продольным растяжением проводят на специализированных установках (рис. 1.11, б), на которых предварительно растянутую заготовку изгибают и обтягивают вокруг шаблона, имеющего форму и размеры детали. Установка состоит из гидроцилиндра растяжения 1, поворотных кронштейнов 2, гидроцилиндра поворота крон-

штейнов 3, направляющей 4, тяг 5, шаблона 6, штока 7, цангового зажима 8. Возможна и другая последовательность работы установки - вначале гибка, а затем растяжение. Весь цикл работы установки автоматизирован.

При гибке с продольным растяжением пружинение весьма незначительно, однако оно полностью не исключается, так как деформация наружных и внутренних слоев заготовки различна, поэтому различным будет и упрочнение этих слоев, оказывающее влияние на упругую деформацию.

При гибке с сжатием действие продольных сжимающих сил аналогично гибке с растяжением. Сжимающие силы уменьшают изгибающий момент, в результате повышается точность размеров изогнутой детали.

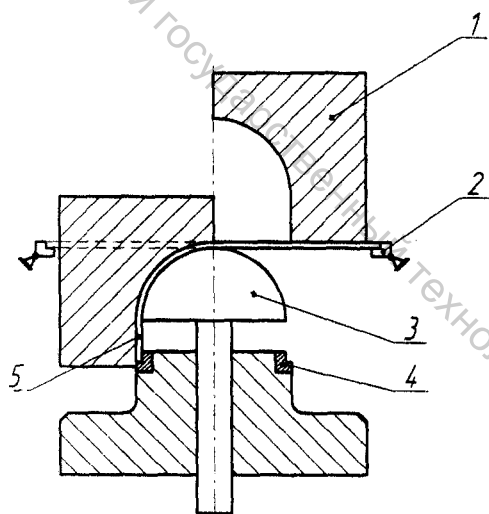


Схема штампа для гибки с продольным сжатием представлена на рис. 1.12. Заготовку укладывают на поворотные опоры 2, и по мере опускания матрицы 1 заготовка изгибается по пуансону 3. В конце рабочего хода краевая часть заготовки упирается в заплевички 4 нижней плиты штампа. При этом возникают продольные силы, сжимающие заготовку.

При гибке с продольным сжатием нейтральная поверхность напряжений смещается в сторону выпуклой поверхности

Рис. 1.12. Штамп для гибки с продольным сжатием:  
1 – матрица; 2 – поворотные опоры; 3 – пуансон; 4 – заплевички; 5 – изделие

заготовки и при сжимающем напряжении, равном пределу текучести, совпадает с ней. Кроме повышения точности размеров, гибка с сжатием позволяет получать двухугловые детали с малым радиусом изгиба. Если напряжения сжатия достигают значений предела текучести, то можно получать радиусы изгиба меньше толщины заготовки.

### 1.11. Вытяжка

Вытяжкой в холодном состоянии можно изготавливать детали толщиной от 0,02 – 0,03 мм до 30 мм, весом до 1 т, а в горячем состоянии – толщиной более 100 мм, весом в десятки тонн. Вытяжкой получают детали разнообразной формы из плоских листовых или полых тонкостенных заготовок, не требующих, как правило, дальнейшей обработки, кроме обрезки края. К ним относятся:

- детали, имеющие форму тел вращения: днища котлов, резервуаров, осветительная аппаратура и др.;
- детали коробчатой формы: топливные баки, канистры, торы и пр.;
- детали, имеющие одну ось симметрии или асимметричные: кузов автомобиля, двери, капот и пр.;
- детали, у которых толщина дна больше толщины стенок: гильзы стрелкового оружия, посуда с толстым дном и пр.

Различают вытяжку *без утонения стенок* и *с утонением*. При вытяжке *без утонения стенок* плоская заготовка превращается в полую деталь без существенного изменения толщины стенок.

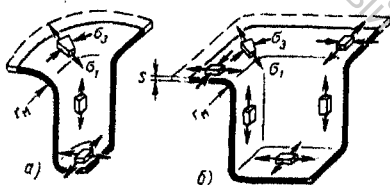


Рис. 1.13. Напряжения в различных зонах вытягиваемых деталей:

а – круглая; б – коробчатая

В процессе вытяжки плоская заготовка затягивается пуансоном в матрицу, в результате поверхность фланца непрерывно уменьшается, а в самом фланце возникают напряжения растяжения  $\sigma_1$ , действующие в радиальном направлении, и нормальные тангенциальные напряжения сжатия  $\sigma_3$  (рис. 1.13, а).

Величина этих напряжений зависит от отношения диаметра заготовки  $D$  к диаметру вытягиваемой детали  $d$ , и чем больше это отношение, тем выше напряжения.

Напряжения распределяются во фланце неравномерно. Растягивающие напряжения  $\sigma_1$ , если не учитывать трения, равны нулю у края заготовки и увеличиваются по мере приближения к кромке матрицы, где они достигают максимума.



Сжимающие напряжения  $\sigma_3$ , наоборот, возрастают по мере удаления от кромки матрицы и достигают максимума у края заготовки и становятся приблизительно равным  $1,1 \sigma_T$  (предел текучести материала, наклепанного в процессе вытяжки).

Ввиду незначительной величины сжимающих напряжений  $\sigma_3$ , возникающих в вертикальном направлении от действия силы прижима, ими обычно пренебрегают и считают, что материал фланца имеет плоскую разноименную схему напряженного состояния.

Дно вытягиваемой детали имеет плоскую одноименную схему напряженного состояния, характеризующуюся весьма небольшими растягивающими напряжениями. В вертикальных стенках действуют продольные растягивающие напряжения, которые равномерно распределены по окружности; величина этих напряжений определяется значением радиальных растягивающих напряжений и дополнительными вредными сопротивлениями, связанными с трением от действия силы прижима, трения и изгибом при перемещении заготовки через вытяжное ребро матрицы.

Растягивающие напряжения приводят к утонению стенок вытягиваемой детали у дна, а сжимающие напряжения во фланце - к утолщению стенок у кромки. Сжимающие силы при относительно тонком материале заготовки и большой степени деформации будут образовывать складки на поверхности той части заготовки, которая расположена на матрице.

Напряженное состояние при вытяжке коробчатой детали более неравномерно, чем при вытяжке цилиндрических деталей. Неравномерности в этом случае зависят главным образом от геометрических соотношений между элементами вытягиваемой коробчатой детали. В элементах фланца, из которого в процессе вытяжки образуются углы радиуса коробчатой детали, имеет место плоская разноименная схема напряженного состояния (рис. 1.13, б) с растягивающими  $\sigma_1$  и сжимающими  $\sigma_3$  напряжениями, аналогичными напряжениям, возникающим при вытяжке цилиндрической детали такого же радиуса и той же высоты, но меньшей величины. По мере удаления от углов напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  падают. В середине прямых сторон фланца вытягиваемой коробчатой детали они наименьшие. Продольные растягивающие напряжения, действующие в вертикальных стенках, также распределяются неравномерно по периметру детали. Величина этих напряжений

так же, как и в случае вытяжки цилиндрических деталей, функционально связана с растягивающими напряжениями в соответствующих местах фланца и напряжениями, связанными с дополнительными вредными сопротивлениями на трение и изгиб. Дно коробчатой детали имеет плоскую одноименную схему напряженного состояния с незначительными растягивающими напряжениями

Сжимающие силы при относительно тонком материале заготовки и большой степени деформации будут образовывать складки на поверхности той части заготовки, которая расположена на матрице. При малой степени деформации и тонком материале заготовки или при толстом материале и даже значительной степени деформации складкообразования практически не происходит. Для предупреждения складкообразования заготовку тем или иным способом прижимают к поверхности матрицы.

Толщина материала плоской заготовки и вытянутой детали различна. В донной части она остается такой же, как и исходной заготовки. Стенки утоняются, а фланец утолщается. Наибольшее утонение имеет участок, находящийся выше места сопряжения стенок и дна, достигающее 30%. Обычно оно не превышает 10-25%.

Основными факторами, определяющими величину утонения, являются: радиус закругления матрицы, смазка, зазор между пуансоном и матрицей, давления прижима фланца. Чрезмерное давление со стороны прижима увеличивает утонение и может привести к отрыву дна детали.

Необходимость применения прижима на первой операции определяется следующими соотношениями:

$$\frac{S}{D} \cdot 100 > 2,0, \text{ а } \frac{d_1}{D} \geq 0,55, \quad (1.28)$$

где  $S$  - толщина заготовки;  $D$  и  $d$  - соответственно диаметры исходной заготовки и вытянутой детали.

Для последующих операций:

$$\frac{S}{d_{n-1}} \cdot 100 > 1,5, \text{ а } \frac{d_n}{d_{n-1}} \geq 0,78. \quad (1.29)$$

Вытяжка коробчатых деталей из плоской заготовки возможна без прижима, если  $\frac{H}{S} \leq 14$  при условии  $H : B < 0,7; r_c : s > 1$ , где  $H$  - высота коробки,  $B$  - ширина коробки,  $r_c$  - радиус сопряжения стенок.

Количество вытяжных операций, необходимых для изготовления цилиндрических деталей без фланца зависит от относительной высоты  $H/D$  и относительной толщины  $S/D$  (рис. 1.14).

Число вытяжных операций деталей из материалов с удовлетворительными пластическими свойствами (сталь для глубокой вытяжки, латунь) может быть ориентировочно назначено по данным таблицы 1.7.

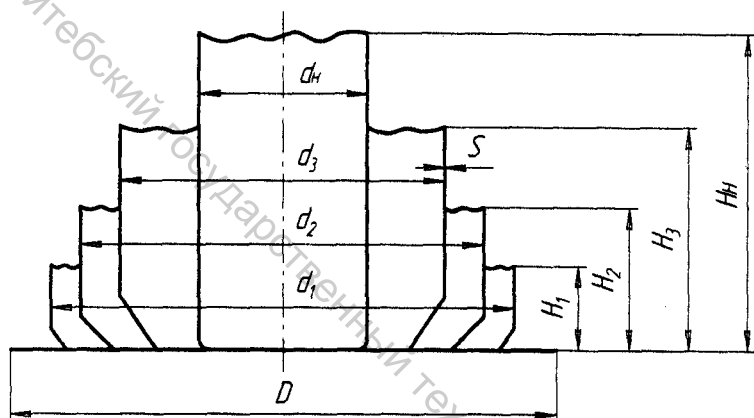


Рис. 1.14. Схема многопереходной вытяжки

Таблица 1.7

Количество вытяжных операций в зависимости от относительной высоты

| $H/D$                        | $<0,6$ | 1,4 | 2,5 | 4 | 7 | 12 |
|------------------------------|--------|-----|-----|---|---|----|
| Количество вытяжных операций | 1      | 2   | 3   | 4 | 5 | 6  |

Если деталь имеет фланец, число вытяжных операций дополнительно зависит от отношения диаметра фланца  $D_f$  к диаметру цилиндрической части  $d$  и значения радиуса перехода  $r_m$  фланца к стенкам; последний составляет  $(3 - 2)S$ .

Таблица 1.8

Количество вытяжных операций для деталей с фланцем

| $D_f/d$ | $H/D$                  |   |   |
|---------|------------------------|---|---|
|         | 0,5                    | 1 | 2 |
|         | Число операций вытяжки |   |   |
| 1,5     | 1                      | 2 | 3 |
| 2       | 2                      | 3 | 4 |
| 3       | 3                      | 4 | 5 |

Расчет операционных размеров деталей производится по коэффициентам вытяжки. Коэффициенты вытяжки цилиндрических деталей без фланца выражают отношения для первой вытяжки  $m_1 = d_1 / D$ ; для второй вытяжки -  $m_2 = d_2 / d_1$ ; для последующих -  $m_n = d_n / d_{n-1}$ . Установив правильную величину коэффициентов вытяжки, определяют диаметры по операциям:

$$d_1 = m_1 D; d_2 = m_2 d_1; d_n = m_n d_{n-1}. \quad (1.30)$$

Общий коэффициент вытяжки:

$$m = d_n / D, \quad (1.31)$$

где  $d_n$  - наружный диаметр вытягиваемой детали;  $D$  - диаметр заготовки, мм.

При вытяжке детали за несколько операций коэффициенты вытяжки для каждой отдельной операции устанавливаются (табл. 1.9) из условия, что их произведение равно итоговому коэффициенту вытяжки, т.е.

$$m = m_1 m_2 \dots m_n. \quad (1.32)$$

Таблица 1.9

Коэффициенты вытяжки цилиндрических деталей без фланца

| Обозначения коэффициентов вытяжки | Значения коэффициентов при относительной толщине $S/D$ 100% |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                   | 2 - 1,5                                                     | 1,5 - 1,0 | 1,0 - 0,5 | 0,5 - 0,2 | 0,2 - 0,6 |
| $m_1$                             | 0,46-0,50                                                   | 0,50-0,53 | 0,53-0,56 | 0,56-0,58 | 0,58-0,60 |
| $m_2$                             | 0,70-0,72                                                   | 0,72-0,74 | 0,74-0,76 | 0,76-0,78 | 0,78-0,80 |
| $m_3$                             | 0,72-0,74                                                   | 0,74-0,76 | 0,76-0,78 | 0,78-0,80 | 0,80-0,82 |
| $m_4$                             | 0,74-0,76                                                   | 0,76-0,78 | 0,78-0,80 | 0,80-0,82 | 0,82-0,84 |
| $m_5$                             | 0,76-0,78                                                   | 0,78-0,80 | 0,80-0,82 | 0,82-0,84 | 0,84-0,86 |

При вытяжке за несколько операций, помимо диаметра, необходимо установить форму сопряжения стенки и дна и рассчитать высоту заготовки на промежуточных операциях. Значение высоты необходимо для определения величины рабочего хода и закрытой высоты пресса, а также для конструирования штампа.

Сопряжения стенок и дна по радиусу применяют для колпачков диаметром менее 60 мм в случае, когда нижнее расположение пуансона не зависит от диаметра. Для больших параметров колпачков предпочтение следует отдать сопряжению по конусу. Меньший диаметр конуса принимают равным диаметру последующей вытяжки, а угол конуса равным  $45^\circ$  (рис. 1.14). Следует указать, что ко-

нусная форма для колпачка позволяет увеличить поверхность заготовки и улучшить условия вытяжки. При сопряжении по радиусу стенок и дна детали у полуфабриката первой вытяжки  $r$  принимают равным  $0,5 r_m$ , а на последующих вытяжках значение  $r$  постепенно уменьшают до приведенных на чертеже, но не более  $0,25$  диаметра пуансона. Любой промежуточный радиус можно рассчитать по формуле:

$$r_i = \frac{d_{i-2} - d_{i-1} - S}{2}. \quad (1.33)$$

Высоту деталей, стенки которых с дном сопрягаются по радиусу, находят из выражения:

для первой операции

$$H_1 = 0,25 \left( \frac{D}{m_1} - d_1 \right) + 0,43 \frac{r_1}{d_1} (d_1 + 0,32 r_1), \quad (1.34)$$

для любой промежуточной операции

$$H_i = 0,25 \left( \frac{D}{m_1 m_2 \dots m_n} - d_i \right) + 0,43 \frac{r_i}{d_i} (d_i + 0,32 r_i). \quad (1.35)$$

Высоту деталей, боковые стенки которых сопрягаются с дном по конусу, находят из выражений:

для первой вытяжки:

$$H_1 = 0,25 \left( \frac{D}{m_1} - d_1 \right) + 0,57 \frac{a_1}{d_1} (d_1 + 0,86 a_1), \quad (1.36)$$

для любой промежуточной вытяжки:

$$H_i = 0,25 \left( \frac{D}{m_1 m_2 \dots m_n} - d_i \right) + 0,57 \frac{a_i}{d_i} (d_i + 0,86 a_i). \quad (1.37)$$

## 1.12. Технологические расчеты при вытяжке

### Размеры и форма заготовки

Исходя из предположения, что приращение площади поверхности вытягиваемой детали из-за утонения стенки равно уменьшению площади ее поверхности вследствие утолщения стенки, диаметр заготовки можно определить из условия равенства поверхностей заготовки и детали.

При расчете диаметра заготовки необходимо учитывать припуск на обрезку волнистой кромки, которая образуется вследствие плоскостной анизотропии механических свойств материала заготовки. Выпуклые участки кромки называют фестонами, их высота достигает 20% от высоты детали. После вытяжки фестоны удаля-

ются обрезкой. Поэтому при расчете диаметра заготовки необходимо учитывать припуск на обрезку.

Для деталей, имеющих форму тел вращения, заготовка имеет форму круга. Поэтому условие равенства площади поверхности заготовки и детали имеет вид:

$$F_{\text{дет}} = 0,785D^2, \quad (1.38)$$

откуда диаметр заготовки

$$D = 1,13\sqrt{F_{\text{дет}}}. \quad (1.39)$$

Если вытягиваемая деталь имеет сложную форму, то для расчета ее поверхности следует использовать правило Гюльдена, согласно которому поверхность тела вращения, описываемого плоской кривой при вращении ее вокруг оси, лежащей в плоскости этой кривой и не пересекающей ее, равна произведению длины кривой  $l$  на длину окружности, описываемой при этом вращении центром тяжести кривой, т. е

$$f = 2\pi lc, \quad (1.40)$$

где  $l$  - длина образующей,  $c$  - расстояние от оси детали до центра тяжести образующей.

Диаметр заготовки на основе приведенного правила рассчитывают следующим образом. Расчетную линию (образующую) (рис. 1.15) вытягиваемой детали с учетом припуска на обрезку разбивают на отдельные участки  $f_1, f_2, f_3$  и т.д., которые представляют отрезки прямых линий или части окружности.

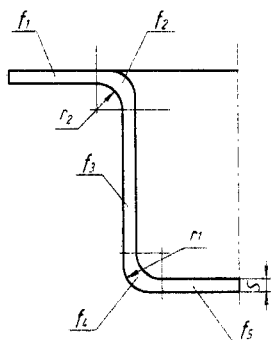


Рис. 1.15. Схема разделения поверхности детали на геометрически простые элементы

Для отрезков прямой центр тяжести находится посередине; для отрезков, являющихся частью окружности, положение центра тяжести приведено в таблице 1.10.

Радиус центра тяжести дуги для выпуклых закруглений составляет

$$c = B + A. \quad (1.41)$$

Для вогнутых закруглений

$$c = B - A, \quad (1.42)$$

где В – расстояние от оси детали до центра закругления.

Таблица 1.10

Положение центра тяжести отрезков дуг

| Центральный<br>угол дуги в<br>градусах. | Расстояние А до оси УУ <sub>1</sub> для углов, примыкающих |               | Расстояние<br>от центра<br>тяжести дуги<br>до центра за-<br>кругления |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------|
|                                         | К вертикали                                                | К горизонтали |                                                                       |
|                                         |                                                            |               | X                                                                     |
| 30                                      | 0,256R                                                     | 0,955R        | 0,988R                                                                |
| 45                                      | 0,373R                                                     | 0,901R        | 0,978R                                                                |
| 60                                      | 0,473R                                                     | 0,827R        | 0,955R                                                                |
| 90                                      | 0,637R                                                     | 0,637R        | 0,90R                                                                 |

Диаметр заготовки определяют, применяя следующую зависимость:

$$D = 2,83 \sqrt{f_1 + f_2 + \dots + f_n} = 2,83 \sqrt{\sum f_i}. \quad (1.43)$$

Форма заготовок для коробчатых деталей зависит от соотношения основных размеров детали: относительной высоты ( $H/B$ ), относительной ширины ( $B/A$ ) и относительного радиуса скругления угловых участков коробки ( $r/B$ ) (рис. 1.16).

Методика построения контура заготовки для низких деталей, у которых  $H/r < 5$ , заключается в следующем:

1. Контур детали в плане вычерчивают в масштабе, после чего делают развертку прямолинейных участков контура детали на плоскость: длину развертки / (считая от плоского участка дна детали) определяют, как при обычной гибке:

$$l = H + 0,57r_d. \quad (1.44)$$

2. По формуле, полученной из условия равенства поверхности заготовки и детали, определяют радиус заготовки  $R_0$ , необходимый для получения цилиндра, вписанного в угловой участок коробки:

$$R_0 = \sqrt{r_y(r_y + 2H) - r_d(0,86r_y + 0,14r_d)}, \quad (1.45)$$

где  $r_d$  — радиус скругления дна цилиндра: при малом  $r_d$

$$R_0 \approx \sqrt{r_y(r_y + 2H)}.$$

3. Радиусом  $R_0$  из центра  $O$  проводят дугу  $a-b$  до пересечения с прямыми  $Oc$  и  $Od$ , ограничивающими прямолинейные участки контура заготовки.

4. Отрезки  $ad$  и  $bc$  делят пополам (точки  $m$  и  $n$  соответственно) и через эти точки проводят касательные к дуге  $ab$ .

5. Касательные, проведенные через точки  $m$  и  $n$ , и прямолинейные участки контура заготовки сопрягают дугами, радиус которых  $R_0$ .

Рассмотренный способ построения контура заготовки для вытяжки низких коробчатых деталей основан на предположении, что недостаток металла (треугольник  $akm$ ) компенсируют его избытком (треугольник  $adf$ ) (рис. 1.16, а)

Форма углового участка контура заготовки зависит от соотношения размеров коробки  $H/r_y$ . При  $H/r_y < 5$  контур углового участка заготовки выпуклый (рис. 1.16, а), при  $H/r_y = 5$  — прямолинейный (рис. 1.16, б), при  $H/r_y > 5$  — вогнутый (рис. 1.16, в).

#### *Исполнительные размеры матриц и пуансонов*

При расчете исполнительных размеров рабочей части матриц и пуансонов вытяжных штампов в зависимости от условий эксплуатации штампуемой (вытягиваемой) детали можно столкнуться с двумя случаями: вытягиваемая деталь в процессе сборки сопрягается по наружному или внутреннему диаметру.

Формулы для расчета исполнительных размеров рабочих деталей вытяжных штампов задаются в соответствии с допуском на вытягиваемую деталь с учетом износа штампа, величины упругой деформации детали и имеют следующий вид:

для вытягиваемой детали, сопрягаемой по наружному диаметру,

$$D_n = (d - 0,8\Delta - 2Z)_{-\delta_n}; \quad (1.46)$$

$$D_m = (d - 0,8\Delta)^{+\delta_m}; \quad (1.47)$$



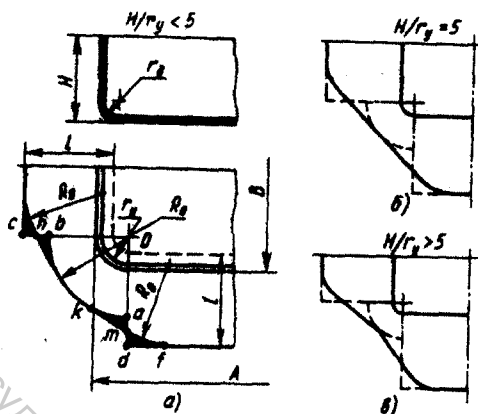


Рис. 1.16. Схемы построения угловых участков заготовок для вытяжки низких коробчатых деталей различной относительной высоты  
а — контур углового участка выпуклый; б — прямолинейный; в — вогнутый

для вытягиваемой детали, сопрягаемой по внутреннему диаметру,

$$D_n = (d + 0,5\Delta)_{-\delta_n}; \quad (1.46)$$

$$D_m = (d + 0,5\Delta + 2Z)^{+\delta_m}; \quad (1.47)$$

где  $D_n$  и  $D_m$  — исполнительный размер пуансона и матрицы в мм;

$d$  — номинальный диаметр (для первого случая наружный диаметр, а для второго — внутренний диаметр штампуемой детали);

$\Delta$  — допуск по диаметру  $d$  на детали;

$Z$  — односторонний зазор между пуансоном и матрицей вытяжного штампа

$\delta_n$  и  $\delta_m$  — допуск на изготовление пуансона и матрицы.

### 1.13. Вытяжка с утонением

Вытяжка с утонением применяется для получения высоких пустотелых деталей или полуфабрикатов, у которых толщина донной части больше толщины стенки.

Вытяжка с утонением осуществляется протягиванием заготовки в виде колпачка (полученного вытяжкой или каким-либо другим способом) через матрицу,

при этом зазор  $z$  между пуансоном и матрицей должен быть меньше толщины стенки заготовки  $z = (D_m - D_n)/2 < s$ .

В процессе вытяжки с утонением происходит уменьшение первоначальной толщины стенки заготовки при относительно небольшом уменьшении ее диаметра. Если учесть, что относительное уменьшение диаметра мало по сравнению с деформациями в осевом (увеличение длины) и радиальном (уменьшение толщины стенки) направлениях, то с небольшой погрешностью можно считать, что вытяжка с утонением происходит в условиях плоского симметричного деформированного состояния.

Вытяжка с утонением осуществляется следующим образом. На заготовку через пуансон передается усилие пресса  $P_{пр}$  (рис. 1.17, а). В процессе вытяжки заготовка скользит относительно пуансона вверх, в результате возникают контактные силы трения между пуансоном и заготовкой  $F_{тр}$ , направленные по ходу движения пуансона. Одновременно заготовка скользит относительно матрицы в направлении движения пуансона. При этом возникают контактные силы трения между матрицей и заготовкой  $F_m$ , направленные против движения пуансона.

При деформировании элементарного объема, выделенного в очаге деформации, возникают нормальные растягивающие  $\sigma_r$ , нормальные сжимающие  $\sigma_n$ , окружные сжимающие  $\sigma_\theta$  и контактные  $\tau$  напряжения (рис. 1.17, б)

Силы трения на поверхности контакта заготовки и пуансона разгружают опасное сечение, уменьшая растягивающие напряжения  $\sigma_r$ . Силы трения на поверхности контакта заготовки и матрицы способствуют увеличению растягивающих напряжений  $\sigma_r$ .

Особенность напряженного состояния при вытяжке с утонением заключается в том, что касательные напряжения  $\tau$  на поверхности контакта заготовки матрицы и пуансона направлены в разные стороны, а сжимающие напряжения  $\sigma_n$  по абсолютному значению велики по сравнению с напряжениями  $\tau$ ,  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$ . Рассмотренная особенность напряженного состояния очага пластической деформации — основная причина того, что допускаемая степень деформации при вытяжке с утонением выше, чем при вытяжке без утонения стенки.

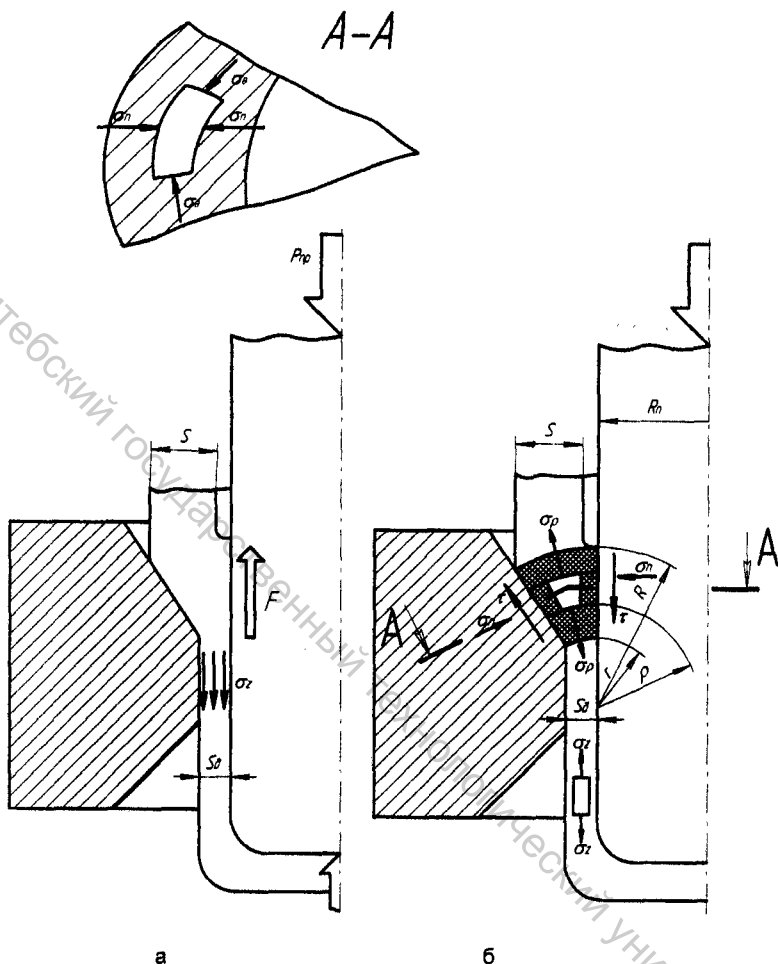


Рис. 1.17. Схемы действия сил (а) и напряжений (б) при вытяжке с утонением

Вытяжка с утонением нашла широкое применение в производстве гильз, оболочек пуль, сильфонов, цилиндрических деталей и др. Этим способом получают детали с полем допуска  $h9 - h12$ . Допуск на толщину стенки составляет 15 – 25% номинальной толщины стенки; допуск на высоту – до 15% высоты изделия.

### Расчет технологических параметров

При вытяжке с утонением расчет осуществляется в следующей последовательности: рассчитывают диаметр заготовки  $D$  и определяют диаметр полый детали (колпачка)  $d_1$  при условии, что осуществляется обычная вытяжка без предварительного утонения стенок; определяют число вытяжек  $n$ , толщину стенок  $t$  и высоту  $h$  на каждом переходе.

Диаметр заготовки  $D$  определяют из условия равенства объема заготовки и детали с учетом объема металла на припуск под обрезку.

$$D = 1,13 \sqrt{\xi V_d / S}, \quad (1.48)$$

где  $\xi$  – коэффициент, учитывающий объем металла, расходуемый на обрезку неровного края полуфабриката;  $V_d$  – объем детали;  $S$  – толщина заготовки.

Диаметр колпачка равен

$$d_1 = m_1 D, \quad (1.49)$$

где  $m_1$  – коэффициент вытяжки;

$D$  – диаметр заготовки.

Коэффициент вытяжки  $m_1$  определяют по таблице 1.9. Число переходов  $n$ , толщина стенок  $t$  и высота деталей  $H_n$  рассчитываются по формулам:

$$n = \frac{\lg t_n - \lg t_1}{\lg \frac{100}{100 - \varepsilon}}; \quad (1.50)$$

$$t_1 = k_1 S; t_2 = k_2 t_1; t_n = k_n t_{n-1}; \quad (1.51)$$

$$H_n = 0,25 \left( \frac{D}{m_1 m_2 \dots m_n} - d_n \right) \frac{t_{n-1}}{t_n} + S; \quad (1.52)$$

где  $\varepsilon$  – допустимая степень деформации;  $k_n$  – коэффициент утонения стенок

$$k_n = t_n / t_{n-1}.$$

Значения  $\varepsilon$  и  $k_n$  приведены в таблице 1.11.

Таблица 1.11

| Материал                | Операции      |         |               |         |
|-------------------------|---------------|---------|---------------|---------|
|                         | Первая        |         | Последующие   |         |
|                         | $\varepsilon$ | $k_n$   | $\varepsilon$ | $k_n$   |
| Сталь мягкая            | 55 - 60       | 45 - 55 | 35 - 45       | 65 - 55 |
| Сталь средней твердости | 35 - 40       | 65 - 60 | 25 - 30       | 75 - 70 |
| Латунь                  | 60 - 70       | 30 - 40 | 50 - 60       | 50 - 40 |
| Алюминий                | 60 - 65       | 40 - 35 | 40 - 50       | 60 - 50 |

### 1.14. Особые способы вытяжки

Рассмотренные выше способы вытяжки широко применяются почти во всех отраслях промышленности. Однако в ряде случаев серийного и мелкосерийного производства они недостаточно эффективны. Например, не всегда приемлема многооперационность процесса вытяжки, поскольку требуется большое количество штампов. Кроме того, для быстрого освоения новых типов изделий необходима разработка новых процессов с применением дешевой универсальной технологической оснастки. В результате работ по улучшению и интенсификации процессов вытяжки созданы и освоены особые способы вытяжки, вызванные специфичностью того или иного производства.

#### *Вытяжка с подогревом и охлаждением*

Этот способ вытяжки является единственным для получения новых деталей из магниевых, многих титановых сплавов и других материалов, переходящих в состояние текучести при напряжениях, близких к пределу прочности, что создает незначительный диапазон пластических деформаций без разрушения.

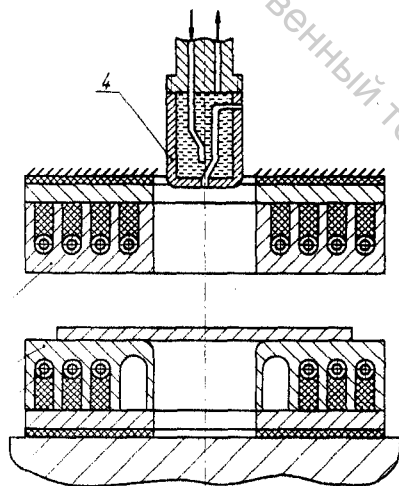


Рис. 1.18. Схема штампа для вытяжки с подогревом: 1 – нагреватели; 2 – матрица; 3 – прижим; 4 – пуансон

Сущность вытяжки с подогревом основана на получении наибольшей разницы между прочностью донной части, вертикальных стенок вытягиваемой детали и сопротивлением деформированию фланцевой части заготовки. Для этого фланец заготовки (рис.1.18), являющийся основным очагом деформации, в процессе вытяжки нагревают с помощью электрических нагревателей 1, вмонтированных в матрицу 2 и складкодержатель 3, до температуры, превышающей температуру рекристаллизации, а стенки и дно детали, через которые передается усилие, искусственно охлаждаются за счет отдачи тепла

пуансону 4, который охлаждается водой, что сохраняет прочность деталей при мерно такой, какой она была до нагрева.

При малом количестве выпускаемых деталей для удешевления изготовления штампов вместо электронагрева сопротивлением можно использовать газовые горелки или индукторы. Создание переменного поля температур на заготовке, согласованного с ее напряженно-деформированным состоянием в процессе формирования, позволяет в какой-то степени выровнять удельные нагрузки по сечениям и разгрузить опасные зоны.

Вытяжка с подогревом может эффективно применяться для алюминиевых сплавов, латуни, малоуглеродистой стали при условии, что толщина заготовки составляет 8,5 - 2 мм.

Температура нагрева фланца должна быть больше температуры рекристаллизации. Она зависит от материала детали. Для алюминия АМ, АМЦМ и дюралюминия Д16-М она равна  $310 - 340^{\circ}\text{C}$ , магниевых сплавов МА1, МА8 -  $360 - 380^{\circ}\text{C}$ , латуни Л62 -  $480 - 500^{\circ}\text{C}$ , стали 08кп -  $550 - 580^{\circ}\text{C}$ , титановых сплавов -  $650 - 700^{\circ}\text{C}$ . Вытяжку деталей с подогревом следует производить на гидравлических или тихоходных кривошипных прессах.

Штамповку с нагревом зоны пластической деформации применяют, в основном, в производстве деталей летательных аппаратов, изготавливаемых из магниевых и алюминиевых сплавов. Установлено, что при вытяжке магниевых сплавов с нагревом фланца до температуры  $350^{\circ}\text{C}$  критическая степень деформации увеличивается в 3 - 3,5 раза по сравнению с вытяжкой без локального нагрева. Особые преимущества вытяжки с подогревом проявляются при изготовлении деталей коробчатых и сложных форм, когда может быть сокращено несколько операций.

Вытяжка с применением глубокого холода основана на способности определенной группы металлов повышать свою прочность при воздействии низких температур. При охлаждении сталей аустенитного класса до температур  $-180^{\circ}\text{C}$  существенно возрастает предел текучести, временное сопротивление и другие характеристики прочности. При этом характеристики пластичности (например, относительное удлинение) снижаются незначительно или остаются без изменения.

Например, при охлаждении сталей 10 и 20 до температуры  $-180^{\circ}\text{C}$  временное сопротивление увеличивается в 1,9 - 2,1 раза, а стали 12Х136 - в 2,3 раза. Относительное удлинение сталей 10 и 20 при этой температуре несколько снижается, а стали 12Х136 остается неизменным. Кратковременное глубокое охлаждение с по-

следующим нагревом до комнатной температуры на структурное состояние указанных сталей не влияет.

Это обстоятельство и используется при вытяжке для повышения прочности опасного сечения путем локального охлаждения зоны передачи усилия.

Глубокое охлаждение осуществляют путем периодической подачи в пустотелый пуансон определенной дозы хладагента в виде жидкого азота или жидкого воздуха, имеющего температуру кипения порядка  $-180^{\circ}\text{C}$ . При этом происходит интенсивное охлаждение пуансона, который, соприкасаясь с заготовкой, отбирает теплоту, охлаждает и повышает прочность металла в зоне контакта пуансона и заготовки. В результате опасное сечение детали способно выдерживать более высокую нагрузку, чем при комнатной температуре. Время охлаждения составляет 10 – 20 сек., поэтому вытяжку с применением глубокого холода осуществляют на гидравлических прессах.

#### Гидромеханическая вытяжка

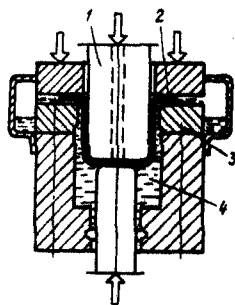


Рис. 1.19. Схема штампа для гидромеханической вытяжки:

1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица;  
4 – камера

Сущность заключается в том, что формоизменение осуществляют жестким пуансоном в полости штампа, заполненной жидкостью (рис. 1.19).

По мере опускания пуансона 1 давление жидкости в камере 4 возрастает настолько, что она начинает вытесняться в круговой зазор между фланцем заготовки 2 и матрицей 3. Высокое гидростатическое давление жидкости создает нормальное давление на внешнюю поверхность детали и тем самым разгружает опасное сечение.

Уменьшение реактивных и увеличение активных (разгружающих) сил трения позволяет повысить предельно-допустимую степень деформации. Методом гидродинамической вытяжки за одну – две операции получают детали конической, параболической, сферической формы, тогда как при вытяжке в жестких штампах для изготовления такого рода деталей требуется три – четыре и более операции.

#### Ротационная вытяжка

Это формообразование деталей типа тел вращения путем локальной деформации в процессе вращения заготовки и поступательного движения вдоль обра-

зующей деформирующего ролика. Ротационная вытяжка применяется в мелкосерийном производстве, когда изготовление вытяжных штампов экономически невыгодно. Этим способом получают детали выпукло-вогнутой конфигурации (рис. 1.20)

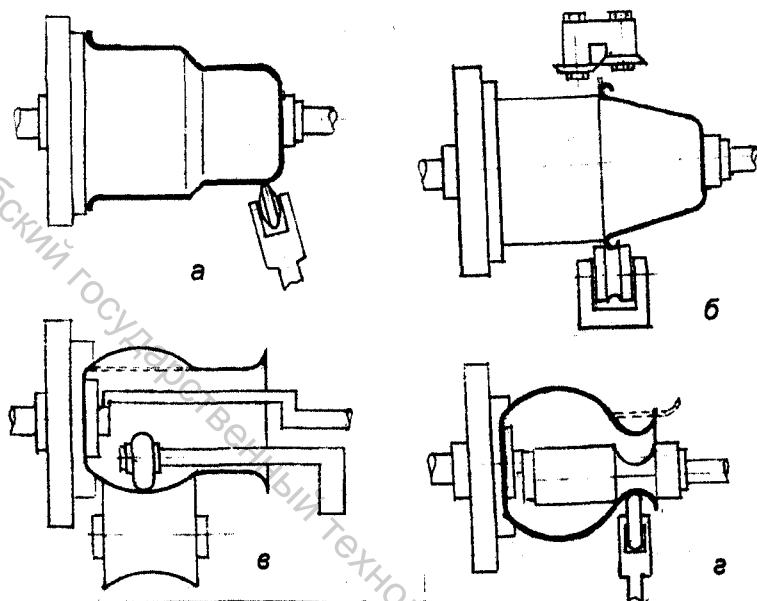


Рис. 1.20. Схемы ротационной вытяжки:

а – наружная раскатка по шаблону; б – обрезка фланца и завивка кромок; в – внутренняя раскатка по наружному ролику; г – наружная раскатка по внутреннему ролику

Оптимальная величина деформации устанавливается экспериментально в зависимости от конфигурации детали, необходимой точности и шероховатости поверхности. Степень изменения формы и размеров детали определяется с помощью коэффициента ротационной вытяжки.

$$m = d / D, \quad (1.53)$$

где  $m$  – коэффициент вытяжки;

$D$  – диаметр заготовки;

$d$  – диаметр изделия.

Допустимые значения коэффициента ротационной вытяжки зависят от материала: для низкоуглеродистых сталей  $m$  изменяется от 0,70 до 0,75; для коррозионно-стойких сталей – от 0,65 до 0,80; для алюминия – 0,78...0,85; для меди



0,7...0,85. Вытяжка конических деталей возможна при предельном отношении  $d_{\min} / D = 0,2...0,3$ , где  $d_{\min}$  - наименьший диаметр конуса.

При ротационной вытяжке металл значительно сильнее утоняется и наклепывается, чем при обычной вытяжке, поэтому детали обычно подвергают промежуточному отжигу.

Частота вращения деталей составляет:

|                   |                             |
|-------------------|-----------------------------|
| мягкая сталь..... | 400 - 600 мин <sup>-1</sup> |
| алюминий.....     | 800 - 1200                  |
| дюралюминий.....  | 500 - 900                   |
| медь.....         | 600 - 800                   |
| латунь.....       | 800 - 1100.                 |

На поверхности вытягиваемых деталей обычно остаются следы инструмента. По окончании процесса особым давилником производят проглаживание наружной поверхности или шабером снимают тонкую стружку (0,02 - 0,05 мм). Точность полученных деталей обычно находится в пределах 0,001 - 0,002 их диаметра.

Ротационная вытяжка (раскатка) выполняется на специальных раскатных станках с гидравлическим перемещением роликов вдоль образующей. Для раскатки небольших деталей применяют станки с горизонтальным, а для крупных деталей с вертикальным шпинделем.

Способ раскатки применяют также для изготовления тонкостенных полднокатанных труб. Этим методом изготовляют различные головки, колпаки, обтекатели и другие детали газовых турбин реактивных самолетов, ракет и т.п. из дюралюминия, нержавеющей стали.

Формообразование раскаткой позволило упростить технологию изготовления крупных деталей указанной формы и получить большую экономию дорогих нержавеющей и жаропрочных сталей.

### 1.15. Отбортовка отверстий

Отбортовка – это процесс образования борта по внутреннему контуру заготовки. Различают отбортовку без преднамеренного утонения стенок и отбортовку с утонением стенок.

Процесс отбортовки без преднамеренного утонения стенок происходит следующим образом. Пуансон, перемещаясь вниз, давит на часть плоской заготовки,

расположенной под отверстием матрицы. Под действием пуансона участки заготовки, прилегающие к отверстию, подвергаются сложному изгибу с растяжением. При этом увеличивается диаметр технологического отверстия. Процесс деформирования заканчивается, когда торец пуансона опускается ниже кромки борта на величину радиуса скругления.

Зона пластической деформации при отбортовке представляет собой кольцевой участок, ограниченный радиусами  $r_{от}$  и  $R$  (рис. 1.21, а). Напряженное состояние зоны пластической деформации — плоское, характеризуемое двухосным растяжением в радиальном и окружном направлениях. В связи с этим пластичность материала заготовки невысокая; высота горловины, полученная отбортовкой, составляет всего 0,2—0,3 ее диаметра.

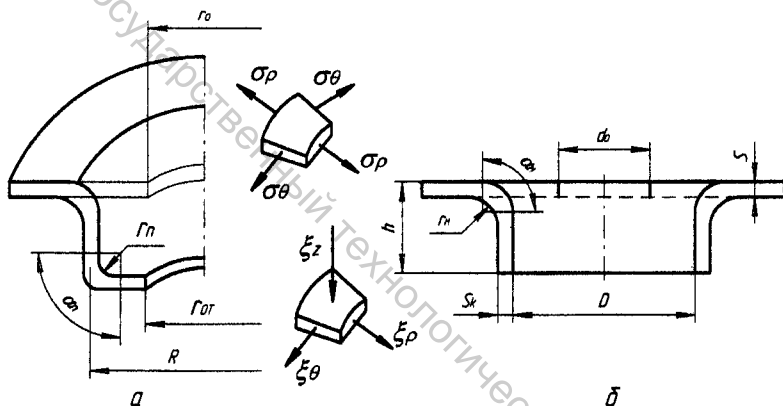


Рис. 1.21. Отбортовка отверстий:

а — распределение напряжений и деформаций в заготовке; б — геометрические размеры заготовки до и после отбортовки

При отбортовке в холодном состоянии происходит упрочнение металла и уменьшение толщины заготовки в зоне деформаций (утонение борта). Эти явления оказывают противоположное влияние на максимальные, радиально направленные растягивающие напряжения  $\sigma_r$  — утонение заготовки уменьшает, а упрочнение увеличивает значение  $\sigma_r$ . Если считать, что влияние упрочнения и утонения на  $\sigma_r$  компенсируют друг друга, то при анализе напряженного состояния их можно не принимать во внимание.

В процессе отбортовки изменяется толщина материала. Наименьшая толщина  $S_k$  получается у края борта и для круглых отверстий рассчитывается по формуле

$$S_k = S \sqrt{d_0 / D}. \quad (1.54)$$

где  $S_k$  – толщина материала у края борта;

$S$  – начальная толщина заготовки;

$d_0$  – диаметр технологического отверстия;

$D$  – диаметр конечного отверстия.

Успешная реализация процесса отбортовки зависит от способа получения технологического отверстия. Отверстие может быть получено пробивкой, сверлением, фрезерованием. Первый способ более производительный, но допускает меньшую степень деформации из-за наклепа, заусенцев и микротрещин; второй и третий менее производительны, но допускают большую степень деформации.

Размеры диаметра технологического отверстия можно определить из условия равенства длины развертки борта ширине деформируемого участка заготовки (рис. 1.21, б).

$$d_0 = D + 2,4S + 0,9r_m - 2h. \quad (1.55)$$

Наибольшая допустимая высота борта ограничивается максимальной степенью деформации или допустимым коэффициентом отбортовки, который определяется отношением диаметра отверстий до и после деформации

$$m = d_0 / D. \quad (1.56)$$

Коэффициент отбортовки зависит от механических свойств материала, состояния материала у кромки технологического отверстия, формы и размеров отверстия, способа его получения. Чем выше относительное удлинение материала, тем меньше коэффициент отбортовки. Если кромка наклепана, что имеет место при пробивке отверстия, величина коэффициента отбортовки больше, чем при сверлении отверстий.

Следовательно, чтобы избежать разрывов при отбортовке, необходимо с кромок технологического отверстия снимать заусенцы, являющиеся концентраторами напряжений, а при использовании материала толщиной более 3 – 5 мм применять отжиг для устранения наклепа после пробивки. Рекомендуется направление отбортовки принимать противоположным направлению пробивки.

При отбортовке прямоугольных и фасонных отверстий коэффициент отбортовки незначительно отличается от коэффициентов отбортовки круглых отверстий и составляет  $m_{cp} = (0,85 + 0,9)m$ . В таблице 1.12 приведены значения коэффициентов для круглых отверстий.

Таблица 1.12

Числовые значения коэффициентов отбортовки для круглых отверстий

| Материал                                       | Коэффициент отбортовки |           |
|------------------------------------------------|------------------------|-----------|
|                                                | $m$                    | $m_{min}$ |
| Сталь мягкая с относительным удлинением 20-30% | 0,72                   | 0,68      |
| Сталь мягкая с относительным удлинением 20-25% | 0,78                   | 0,75      |
| Латунь Л62, Л68                                | 0,68                   | 0,62      |
| Алюминий и АМц                                 | 0,70                   | 0,64      |
| Титановые сплавы:                              |                        |           |
| BT1 в холодном состоянии.....                  | 0,64-0,68              | 0,55      |
| BT5 в холодном состоянии.....                  | 0,85-0,90              | 0,75      |
| BT1 при нагреве на 300 – 400°.....             | 0,60-0,50              | 0,45      |
| BT5 при нагреве до 500 - 600 °.....            | 0,70-0,65              | 0,55      |

*Примечания:* 1. Значения  $m_{min}$  следует принимать лишь в случаях, если отверстие под отбортовку получают сверлением.  
 2. Таблица составлена для относительной толщины заготовок  $100S/d < 5$ . Если  $100S/d > 5$ , коэффициент отбортовки меньше на 5 – 15%.  
 3. Приведенные данные относятся к материалам толщиной  $S$  до 6 мм.

Исходя из принятых значений коэффициентов отбортовки, формируемая за одну операцию высота борта с круглым отверстием равна

$$h = \frac{D - d_0}{2} + 0,43r + 0,72S. \quad (1.57)$$

#### Отбортовка с утонением

При отбортовке с утонением стенок достижима более высокая степень деформации, чем при обычной отбортовке, а это значит, что при одном и том же коэффициенте отбортовки можно получить более высокий борт.

Детали имеют высокую точность диаметральных размеров горловины (IT8 – IT10) и низкую шероховатость поверхности ( $Ra$  1,6 – 3,2). Кроме того, в результате холодной пластической деформации твердость горловины увеличивается на 30 – 40% по сравнению с твердостью заготовки.

Отбортовку с утонением выполняют конусным пуансоном. Вначале осуществляется отбортовка без утонения, а затем, когда в матрицу войдет цилиндрическая часть пуансона, начинается отбортовка с утонением (рис. 1.22).

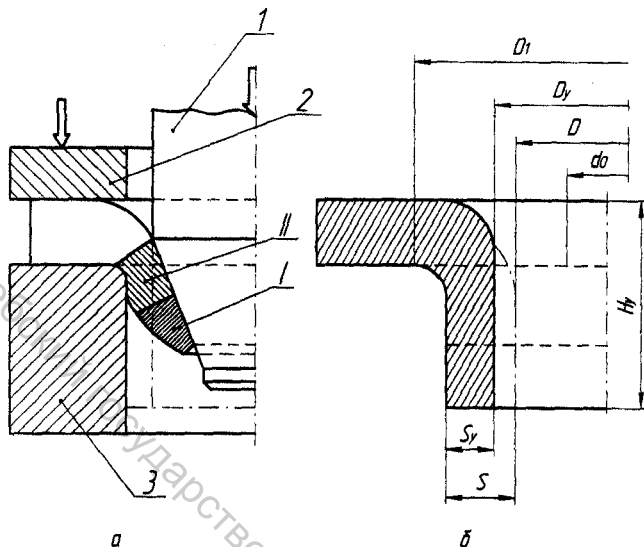


Рис. 1.22. Отбортовка отверстий с утонением: а – очаг пластической деформации; б – геометрические размеры заготовки; 1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – матрица; I – участок отбортовки без утонения стенок; II – участок отбортовки с утонением

Очаг пластической деформации при отбортовке с утонением состоит из участка I, в пределах которого осуществляется отбортовка без утонения, и участка II, где происходит преднамеренное утонение борта. На участке I очага пластической деформации возникает плоское напряженное состояние, на участке II – объемное.

Высота борта при вытяжке с утонением рассчитывается по формуле

$$H_y = H + \frac{1}{2} \left( \frac{S}{z} - 1 \right) (H - h), \quad (1.58)$$

где \$H\$ – высота борта без утонения; \$z\$ – зазор между цилиндрической частью пуансона и матрицей; \$h\$ – часть борта, не подвергаемая утонению,

$$h = \frac{z - S_y}{S - S_y} H, \quad (1.59)$$

где \$S\_y\$ – толщина стенки детали.

### 1.16. Обжим

Обжим – это операция, предусматривающая уменьшение части поперечного сечения полой заготовки. В массовом и крупносерийном производстве обжим осу-

ществляется в специальных штампах, рабочий орган которых – кольцевая матрица. В зависимости от формы детали используют прямолинейную, наклонную к оси симметрии или криволинейную образующую.

Обжимом получают горловины цилиндрических бидонов, различные переходники трубопроводов, горловины гильз и пр.

При обжиге внутренняя поверхность очага деформации не нагружена, а напряжение  $\sigma_n$ , передаваемое матрицей, при относительно тонкостенной заготовке мало по сравнению с напряжением текучести. Можно считать, что напряженное состояние при обжиге плоское, характеризуемое двухосным неравномерным сжатием нормальными напряжениями  $\sigma_p$  и  $\sigma_\theta$  (рис. 1.23, а).

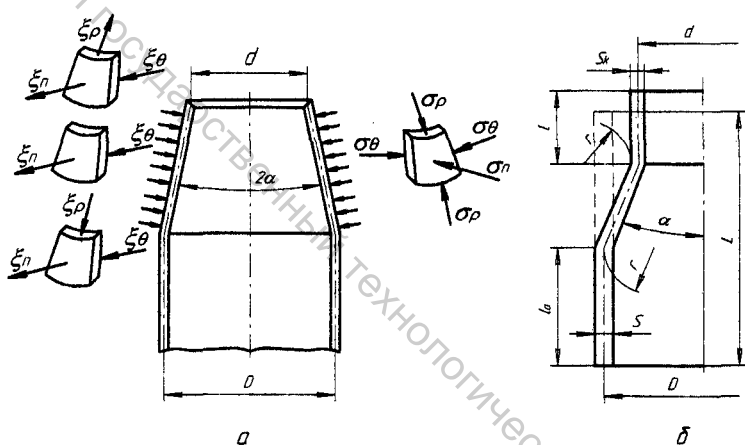


Рис. 1.23. Схема напряженно-деформированного состояния при обжиге (а) и схема геометрических параметров до и после обжига (б)

При обжиге деформированное состояние по очагу деформации неоднородно, оно изменяется в зависимости от соотношения главных нормальных напряжений  $\sigma_p$  и  $\sigma_\theta$ . Толщина стенки у края деформированной заготовки больше толщины стенки исходной заготовки (рис. 1.23, б).

$$S_k = S\sqrt{D/d} = S\sqrt{k_{обж}}, \quad (1.60)$$

где  $S_k$  – толщина стенки у края заготовки;

$S$  – начальная толщина стенки;

$k_{обж}$  – коэффициент обжима  $k_{обж}=D/d$ .

Число обжимных операций определяют по формуле

$$n = \frac{\lg d / D}{\lg k_{\text{обж}}}. \quad (1.61)$$

Коэффициент обжима для одной операции принимается по таблице

1.13.

Таблица 1.13

Числовые значения коэффициента обжима

| Штампуемый материал | Тип штампа          |                             |                                          |
|---------------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------------------|
|                     | Без противодействия | С наружным противодействием | С внутренним и наружным противодействием |
| Мягкая сталь        | 0,70-0,75           | 0,55-0,60                   | 0,30-0,35                                |
| Латунь              | 0,65-0,70           | 0,50-0,55                   | 0,27-0,32                                |
| Алюминий            | 0,68-0,72           | 0,53-0,57                   | 0,27-0,32                                |

Высота детали с конической краевой частью (рис. 1.23, а) и цилиндрической (рис. 1.23, б) соответственно равны

$$H = 1,05 \left[ l_0 + \frac{D^2 - d^2}{8D \cos \alpha} \left( 1 + \sqrt{\frac{D}{d}} \right) \right]. \quad (1.62)$$

$$H = 1,05 \left[ l_0 + l \sqrt{\frac{d}{D}} + \frac{D^2 - d^2}{8D \cos \alpha} \left( 1 + \sqrt{\frac{D}{d}} \right) \right]. \quad (1.63)$$

Продольную длину заготовки, из которой можно получить после обжима деталь требуемых размеров, определяют из условия неизменности объема. При этом диаметр и толщина стенки заготовки принимаются равными диаметру и толщине стенки необжатого участка.

Конический и цилиндрический участки детали после обжима имеют утолщенную стенку. Приняв, что толщина стенки конического участка изменяется от  $S$  до  $S_k$  по линейному закону, формула для расчета длины исходной заготовки с конической краевой частью обжатой детали имеет вид:

$$L = l_0 + \frac{d + D - 2r(1 - \cos \alpha)}{4D} \left( \frac{D - d}{2 \sin \alpha} - r \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \left( 1 + \sqrt{\frac{D}{d}} \right) + \frac{\pi r \alpha}{180}. \quad (1.64)$$

Для детали с коническо-цилиндрической частью

$$L = l_0 + l \sqrt{\frac{D}{d}} + \left( 1 + \frac{d}{D} \right) \left[ \frac{1}{4} \left( 1 + \sqrt{\frac{D}{d}} \right) \left( \frac{D - d}{2 \sin \alpha} - 2r \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \right] + \frac{\pi r \alpha}{180}, \quad (1.65)$$

где  $r$  – радиус изгиба нейтрального слоя.

### 1.17. Раздача

Раздача – операция, предусматривающая увеличение размеров части поперечного сечения заготовки. В результате раздачи происходит уменьшение толщины стенки и длины образующей. В очаге деформации возникают окружные растягивающие и радиальные сжимающие напряжения (рис. 1.24)

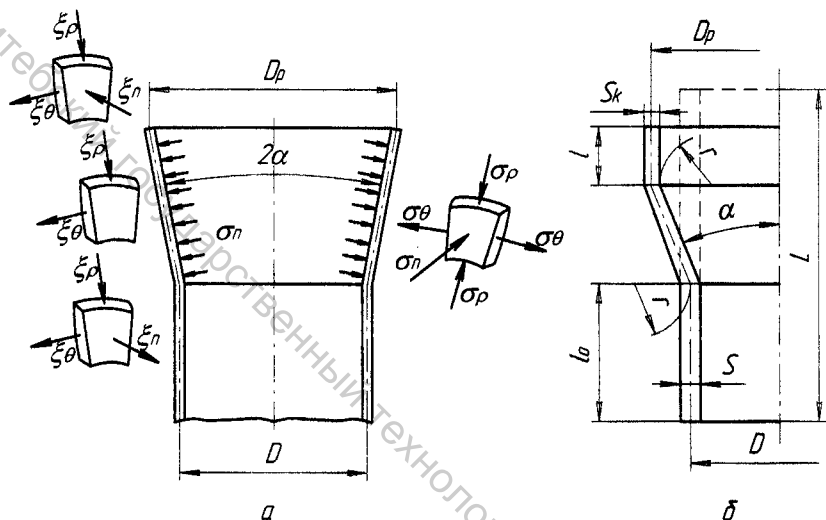


Рис. 1.24. Схема напряженно-деформированного состояния при раздаче (а) и схема геометрических параметров до и после раздачи(б)

Формоизменение заготовки оценивается коэффициентом раздачи, представляющим собой отношение наибольшего диаметра деформированной части  $D_p$  к диаметру заготовки  $D$ :

$$k_p = D_p / D. \quad (1.66)$$

Таблица 1.14

Числовые значения коэффициента раздачи для мягкой стали

|         |      |      |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|------|------|
| $S/D_p$ | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 |
| $k_p$   | 1,46 | 1,5  | 1,52 | 1,53 | 1,55 | 1,56 |
| $S/D_p$ | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,14 |      |
| $k_p$   | 1,58 | 1,59 | 1,60 | 1,63 | 1,68 |      |



Толщина материала при раздаче уменьшается, конечную толщину в месте наибольшего растяжения  $S_k$  определяют по формуле:

$$S_k = S \sqrt{1/k_p}. \quad (1.67)$$

Длина заготовки  $L$ , из которой можно получить деталь требуемых размеров, определяется из условия равенства объема заготовки до и после раздачи, а диаметр и толщина стенки заготовки принимаются равными диаметру и толщине стенки цилиндрического участка детали  $D$  и  $S$  соответственно.

Для деталей с краевой конусной частью:

$$L = l_0 + \frac{D_p + D + 2r(1 - \cos \alpha)}{4D} \left( \frac{D_p - D}{2 \sin \alpha} + r \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \left( 1 + \sqrt{\frac{D}{D_p}} \right) + \frac{\pi r \alpha}{180}. \quad (1.68)$$

Для деталей с краевой конусно-цилиндрической частью:

$$L = l_0 + l \sqrt{\frac{D_p}{D}} + \left( 1 + \frac{D_p}{D} \right) \left[ \frac{1}{4} \left( 1 + \sqrt{\frac{D}{D_p}} \right) \left( \frac{D_p - D}{2 \sin \alpha} - 2r \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \right] + \frac{\pi r \alpha}{180}. \quad (1.69)$$

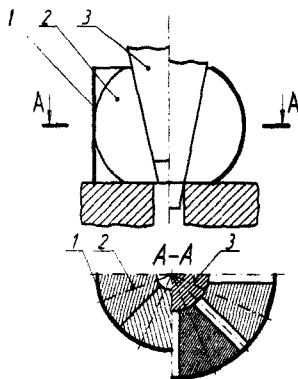


Рис. 1.25. Схема процесса формования разжимным инструментом: слева в исходном; справа в конечном положении;

1 — заготовка; 2 — разжимной инструмент; 3 — клин

Одним из перспективных методов реализации процесса раздачи заготовок является формообразование секционным разжимным инструментом. Сущность метода заключается в деформировании полой заготовки разжимным инструментом, который раздвигается клином (рис. 1.25).

В процессе раздачи заготовка деформируется до заданных размеров, приобретая форму разжимного инструмента. Клин возвращается в исходное положение; секции инструмента под действием механизма возврата смыкаются, а готовое изделие свободно удаляется.

Секционным зажимным инструментом изготавливают детали из цельных или сварных цилиндрических и конических заготовок.

Номенклатура изделий весьма обширна (рис. 1.26). Возможно получение изделий диаметром до 2000 мм и высотой 1000 мм и более.

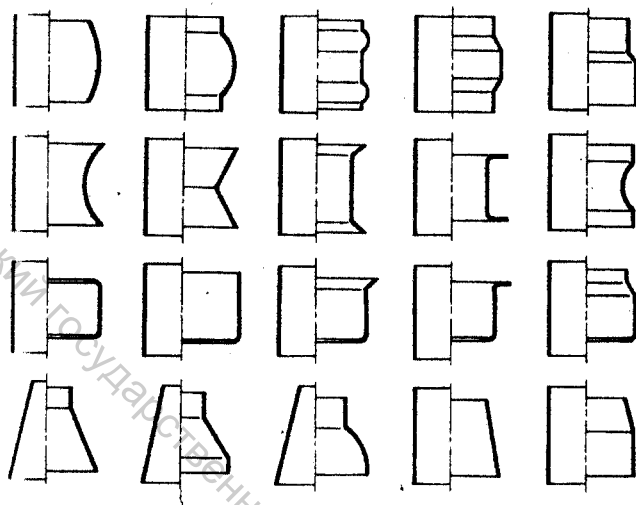


Рис. 1.26. Детали, полученные секционной раздачей: слева - исходные заготовки; справа – готовые изделия

Недостатком процесса раздачи секционным инструментом является образование оgranки в виде прямолинейных участков, появляющихся на поверхности готового изделия вследствие раздвижения секций инструмента.

### 1.18. Комбинированная штамповка

Для снижения трудоемкости (3 – 8 раз), удешевления стоимости деталей, повышения точности их изготовления и более простого решения автоматизации процесса штамповки используется метод объединения (концентрации) простых операций, получивший название *комбинированной штамповки*.

Комбинированная штамповка может быть осуществлена на универсальных и многопозиционных прессах. Комбинированная штамповка на универсальных прессах производится в штампах последовательного, совмещенного и совмещенно-последовательного действия.

В комбинированных штампах последовательного действия переходы (операции) размещаются в направлении подачи полосы (ленты) или штучной заготовки, причем одновременно деформируется количество полуфабрикатов, равное

количеству рабочих переходов, а каждый полуфабрикат получает деформацию, соответствующую одному определенному переходу.

В комбинированных штампах совмещенного действия переходы обычно размещаются в направлении перемещения ползуна прессы, причем заготовки деформируются последовательно по мере перемещения ползуна. В отдельных случаях, помимо переходов, размещенных в направлении движения ползуна прессы, выполняют переходы, требующие перемещения инструмента от клиньев в перпендикулярном направлении к перемещению ленты.

Комбинированные штампы совмещенно-последовательного действия построены на сочетании первых двух вариантов, т.е. переходы (операции) частично выполняются в направлении перемещения ползуна прессы, а частично в направлении подачи полосы.

Выбор способа штамповки - на штампах простого действия (дифференцированный процесс) или на штампах комбинированного действия (концентрированный процесс) - должен базироваться на технико-экономическом анализе каждого из указанных вариантов.

Комбинированная штамповка на многопозиционных пресс-автоматах является наиболее прогрессивным процессом.

За один рабочий ход могут штамповаться детали, требующие различных операций: разделительных, вытяжных, гибочных, формовочных.

Комбинированная штамповка на универсальных прессах осуществляется по одной из следующих схем:

1. Из полосы или ленты вырубка по наружному контуру готовых деталей осуществляется на последнем переходе.

2. Из полосы или ленты вырубка по наружному контуру предшествует формоизменяющим переходам, после чего вырубленная заготовка впрессовывается обратно в ленту или полосу и перемещается вместе с ней на последующие формоизменяющие переходы.

3. Из полосы или ленты вырубка заготовки по наружному контуру производится перед формоизменяющими переходами, передача заготовки на формоизменяющие переходы производится специальными механизмами штампа.

4. Из предварительно изготовленной штучной заготовки подача в штамп осуществляется вручную, а передача заготовки с одного перехода на другой -

вручную или специальными механизмами (шиберными, револьверными, грейферными и т.д.).

Первую схему следует применять для деталей, требующих разделительных операций: пробивки, надрезки, зачистки, снятия припуска по части контура вырубki, а также для деталей, требующих разъединительных и несколько формоизменяющих операций: пробивки отверстий, гибки, разбортовки, отбортовки, вытяжки и др., при условии, что окончательная вырубка является последним переходом. Преимуществом этого способа следует считать возможность объединения большого числа переходов, т.е. использовать его для изготовления деталей сложной конфигурации. Имеются комбинированные штампы последовательного действия, объединяющие до 25 переходов.

Факторами, ограничивающими применение комбинированных штампов, являются габаритные размеры изготавливаемых деталей. Метод комбинированной штамповки используется для изготовления мелких деталей (линейный размер в направлении подачи менее 200 мм) и, как исключение, для деталей средних размеров.

Вторую схему, т.е. комбинированную штамповку в полосе или ленте с вырубкой заготовки перед формоизменяющими переходами и запрессовкой вырубленной заготовки обратно в полосу, применяют для деталей, требующих одного формоизменяющего перехода при условии, что толщина материала равна 0,3 - 2,0 мм. Если толщина менее 0,3 мм, то заготовка, запрессованная обратно в ленту, ненадежно держится. Если толщина материала более 2,0 мм, требуется большое усилие для запрессовывания и затрудняется выталкивание заготовки.

Третью схему, т.е. комбинированную штамповку в полосе с вырубкой заготовки перед формоизменяющим переходом и передачей этой заготовки специальными устройствами, следует применять в тех случаях, что и вторую, но для материалов толщиной 0,6 - 6,0 мм.

Четвертую схему, т.е. штамповку из штучных заготовок, следует применять для деталей, требующих в основном формоизменяющих переходов. Если передача с одного формоизменяющего перехода на другой осуществляется вручную, то число переходов должно быть не более трех.

Из рассмотренных схем построения комбинированных штампов последовательного действия необходимо обратить внимание на вторую и особенно третью

схему. Особенно целесообразны такие схемы для деталей малых габаритных размеров, т.е. требующих одного формоизменяющего перехода (операции).

### **1.19. Импульсная штамповка**

Изначально импульсные способы формообразования разрабатывались для получения крупногабаритных изделий как альтернатива традиционной штамповке ввиду ограниченных возможностей прессового оборудования. В дальнейшем развитие новых способов импульсной штамповки расширило их возможности и обеспечило формообразование изделий средних и малых размеров. В отличие от традиционных способов формообразования процессы импульсной штамповки осуществляются с высокой скоростью деформации металла.

Высокоскоростной импульсный характер приложения нагрузок к обрабатываемой заготовке существенно улучшает условия деформирования: локализуется очаг деформации и повышается его температура; возникают полезные силы инерции; уменьшаются силы трения. Все это, в конечном итоге, снижает усилие деформирования и улучшает качество деталей.

Применение импульсных процессов привело к созданию принципиально нового оборудования, в котором вместо жесткой металлической конструкции, воспринимающей усилие, применена небольшая инерционная масса, движущаяся с большой скоростью. Существенным преимуществом импульсного деформирования перед обычными способами формообразования металлов является возможность получения деталей сложной формы за один переход, использование относительно простой оснастки и обеспечение точной конфигурации.

Получили наибольшее применение следующие способы импульсной штамповки:

- *штамповка взрывом;*
- *электрогидроимпульсная штамповка;*
- *магнитноимпульсная штамповка.*

#### **Штамповка взрывом**

Штамповка взрывом основана на деформации листовой заготовки давлением ударной волны, образующейся при взрыве бризантных взрывчатых веществ, пороха или газовой смеси. Передающей средой является жидкость, сыпучие материалы, воздух или их комбинация.

Время детонации взрывчатых веществ составляет 20-30 мкс, а время деформации заготовки исчисляется миллисекундами. Поэтому давление взрыва дей-

ствуется на заготовку лишь в начальный момент, после чего металл заготовки деформируется по инерции в результате сообщенной ему кинетической энергии.

Штамповка взрывом крупногабаритных и средних заготовок осуществляется в бассейнах с водой, малых заготовок - в специальных наземных установках (рис. 1.27).

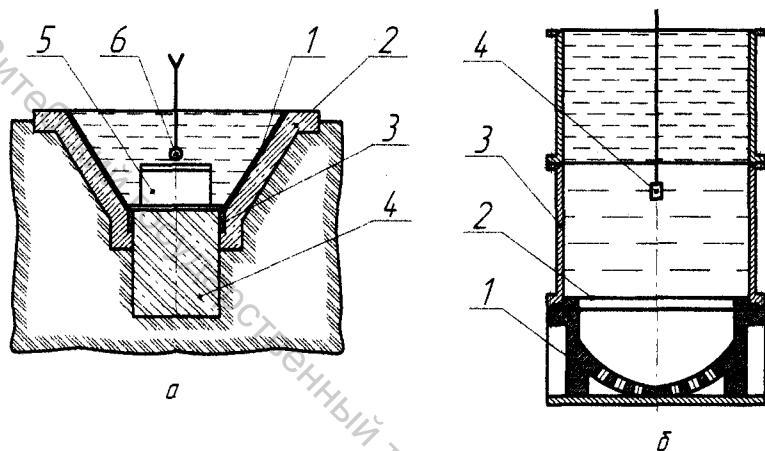


Рис. 1.27. Схема установок для штамповки взрывом

а - бассейн с водой для штамповки заготовок крупных и средних размеров: 1 - стальная обшивка; 2 - бетонный бассейн; 3 - гидроизоляция; 4 - фундамент; 5 - штамп; 6 - заряд взрывчатого вещества

б - установка для штамповки заготовок малых размеров: 1 - штамп; 2 - заготовка; 3 - бронеканера; 4 - заряд взрывчатого вещества

Для штамповки взрывом изделий из высокопрочных и жаропрочных сплавов повышенной хрупкости (титановые, молибденовые сплавы) получила применение горячая штамповка взрывом с подогревом заготовки. Передаточной средой при горячей штамповке взрывом обычно служит песок. При горячей штамповке иногда применяется дополнительный подогрев песка до температуры  $900 - 1000^{\circ}\text{C}$ .

Штамповка взрывом обеспечивает выполнение многих операций: пробивку, вырубку, формовку, вытяжку, отбортовку, калибровку, плоскую и пространственную правку и др.

Основными достоинствами штамповки взрывом являются низкая стоимость оснастки и небольшие капитальные затраты; сокращение числа технологических переходов; высокая точность обработки; возможность изготовления деталей сложной

формы из труднодеформируемых сплавов. К недостаткам относятся экономическая неэффективность при серийном и массовом производстве; сложность управления процессом; повышенные требования к охране труда. Штамповку взрывом целесообразно применять при изготовлении единичных образцов изделий крупногабаритных размеров.

#### Электрогидроимпульсная штамповка (ЭГШ)

Сущность электрогидроимпульсной штамповки заключается в том, что энергия разряда электрической дуги в жидкости преобразуется в механическую энергию в виде ударной волны, которая вызывает пластическое формоизменение заготовки.

Принципиальная схема установки для ЭГШ представлена на рис. 1.28, а. Установка включает источник питания 1; повышающий трансформатор 2; конденсаторную батарею большой емкости 3; разрядник 4; электроды 5; камеру с водой 6. От источника 1 через трансформатор 2 ток поступает в батарею 3, в которой происходит накопление электрической энергии. После замыкания разрядника 4 между электродами образуется электрическая дуга. В результате пробоя межэлектродного промежутка в жидкости образуется токопроводящий канал, появление которого начинается с образования нескольких или целой серии лидеров. Лидер – это ярко светящийся плазменный канал диаметром 0,1 – 2 мм. Лидеры образуют потоки электронных лавин. Когда один или несколько лидеров достигнут противоположного электрода, лидерная стадия разряда заканчивается и начинается вторая стадия разряда.

На второй стадии происходит выделение в канале разряда большей части запасенной конденсатором энергии. В результате быстрого нарастания мощности температура плазмы в канале достигает 15000-10000°K.

Интенсивный разогрев плазмы разрядным током приводит к расширению канала со скоростью  $10^4$  м/сек и повышению давления. Через 0,1 – 0,3 мкс с момента образования диаметр плазменного канала увеличивается до 1 – 3 мм.

Увеличение объема канала плазмы вызывает в жидкости ударную волну. Фронт ударной волны, вначале неотделимый от канала, через 0,5 – 1,5 мкс отрывается от него. Давление ударной волны 100 – 140 ГПа. По существу и характеру протекания – это электрический взрыв, способный деформировать и разрушать различные материалы.

Применяют два способа превращения электрической энергии в механическую: разряд через зазор в жидкости и разряд через проволоку. В первом случае электроды разъединены жидкостью, а во втором – они соединены проволокой, на-

зывается инициатором разряда. Рабочее напряжение при разряде через жидкость должно быть порядка 20 – 30 кВ, а при разряде через проволоку – 4 – 7 кВ.

Технологические схемы ЭГШ выполняются с открытой (рис. 1.28, б) и закрытой (рис. 1.28, в) камерами. Коэффициент полезного действия ЭГШ составляет 5 – 20%. Наибольший КПД достигается в установках с замкнутым объемом жидкости в закрытой камере.

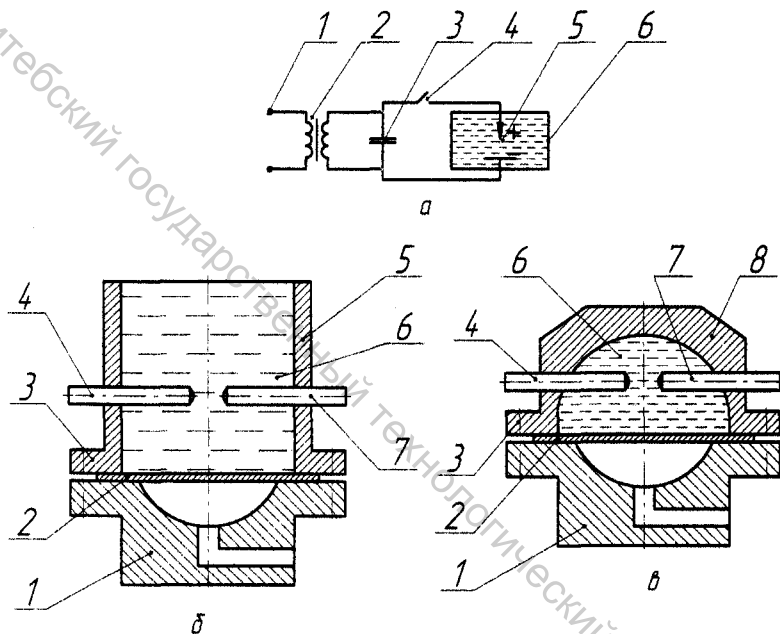


Рис. 1.28. Электрогидравлическая штамповка

а – принципиальная схема установки: 1 – источник напряжения; 2 – трансформатор; 3 – конденсатор; 4 – разрядник; 5 – электроды; 6 – камера с водой;

б, в – схемы технологических блоков соответственно с открытой и закрытой камерами: 1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – зажим; 4, 7 – электроды; 5 – камера открытая; 6 – жидкость; 8 – камера закрытая

При использовании высоковольтного электрического разряда или взрыва проводников в жидкости можно выполнять все основные операции листовой штамповки (рис. 1.29). Получают детали из плоской заготовки толщиной 3...5 мм размером до 2000 мм и более, а из пространственных заготовок – до 250-350 мм и высотой до 800...900 мм. Толщина стенок пространственных заготовок колеблется в пределах 0,2...2,5 мм.



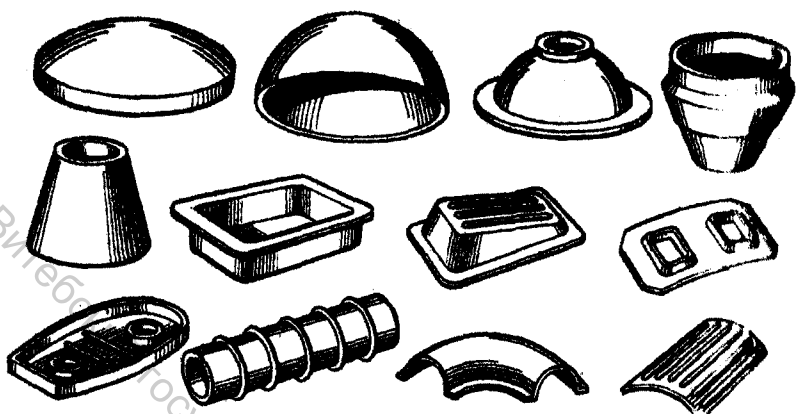


Рис. 1.29. Детали, изготавливаемые электрогидравлической штамповкой

По сравнению с традиционной штамповкой ЭГШ обладает рядом преимуществ: упрощается и удешевляется технологическая оснастка, что способствует сокращению сроков подготовки производства; повышается точность изделий вследствие уменьшения пружинения, особенно при обработке труднодеформируемых материалов; расширяется возможность совмещения операций, выполняемых за один или несколько разрядов в штампе; возрастают значения критических степеней деформаций, достигаемых за один переход.

Электрогидравлическая штамповка имеет ряд преимуществ перед штамповкой взрывом:

- лучшая управляемость процессом за счет варьирования количества импульсов и местоположения электродов;
- возможность изменения энергии импульса;
- возможность осуществления многократного разрядного импульса;
- возможность размещения электрогидравлических установок в производственных помещениях.

В условиях мелкосерийного и единичного производства, когда доля затрат на технологическую оснастку в структуре себестоимости и капитальных вложений имеет наибольший вес и достигает 80...95%, применение ЭГШ наиболее целесообразно. При массовом производстве ЭГШ экономически неэффективна.

### Магнитноимпульсная штамповка

Сущность штамповки импульсом магнитного поля заключается в использовании электромеханических сил, возникающих в результате взаимодействия магнитных полей индуктора и заготовки, отталкивающих их друг от друга. Принципиальная схема установки для магнитноимпульсной штамповки аналогична электрогидроимпульсной. Отличие в конструкции технологического блока, который состоит из индуктора и матрицы (или пуансона) (рис. 1.30, а, б). Индуктор может быть в виде соленоида (если заготовка круглая) или плоским.

При разряде конденсаторной батареи на индуктор вокруг него возникает магнитное поле, наводящее вихревые токи в металлической заготовке. Взаимодействие магнитных полей индуктора и заготовки создает механическую силу, способную деформировать заготовку. Сила воздействия магнитных полей пропорциональна энергии, накопленной в батарее конденсаторов. Разряд происходит в течение 40 – 50 мкс. Давление на заготовку достигает  $2 \times 10^6$  ГПа. Заготовка получает ускорение и к моменту контакта с инструментом достигает скорости 200-300 м/сек. Металлы с малым электрическим сопротивлением (медь, алюминий, латунь и др.) деформируются лучше, чем металлы с высоким электросопротивлением (сталь, титан и др.) С целью интенсификации силового воздействия материалы с высоким сопротивлением покрывают тонким электролитическим слоем меди, алюминия или между индуктором и заготовкой помещают прокладки в виде фольги.

Штамповка труднодеформируемых металлов осуществляется путем предварительного нагрева заготовки и ее последующей деформации. При этом нагрев и деформация заготовки осуществляются одним индуктором.

Наиболее слабым звеном в технологическом блоке являются индукторы, испытывающие большие динамические нагрузки, соответствующие создаваемым ими магнитным полям и давлению, действующему на заготовку. Индукторы изготавливают из медных трубок, ленты или проволоки круглого или прямоугольного сечения. Целесообразно изготавливать индукторы из стали, плакированной металлом высокой электропроводности. Такие индукторы обладают повышенной прочностью при высоких электрических показателях.

Выделение теплоты, происходящее при разряде, разогревает индуктор. Поэтому для увеличения срока службы индукторов их выполняют полыми для охлаждения проточной водой. Индуктор монтируют в специальном корпусе и заливают

индукционным материалом, который, кроме высоких электрических показателей, должен иметь достаточную механическую прочность.

Стоимость индуктора резко возрастает (до  $10^4 \dots 10^6$  операций), если применяются концентраторы – специальные металлические вставки, концентрирующие магнитное поле индуктора на отдельных участках. Концентратор сжимает магнитный поток и увеличивает его напряженность на требуемых участках. Концентраторы представляют собой толстостенные втулки с радиальным разрезом (рис. 1.30, в) и выполняются из высокопрочного материала, обладающего высокой проводимостью.

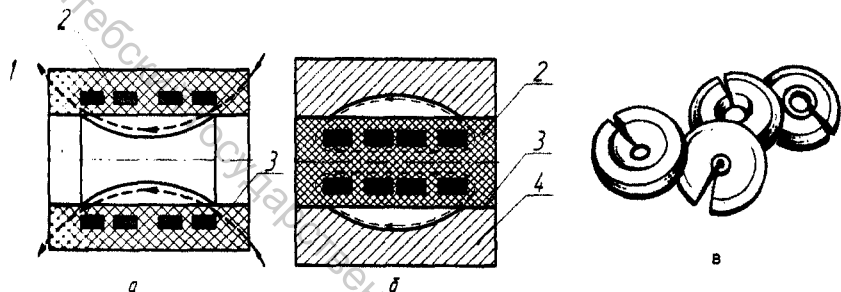


Рис. 1.30. Магнитноимпульсная штамповка:

а, б – технологические блоки соответственно для обжима и раз- а – концентраторы магнитного  
 дачи заготовок: 1 – пуансон; 2 – индуктор; 3 – заготовка; 4 – мат- поля  
 рица; I – направление магнитных силовых линий

Магнитноимпульсная штамповка имеет ряд преимуществ перед другими импульсными способами обработки. Давление на деформируемую заготовку создается непосредственным воздействием магнитного поля без участия промежуточной среды. Это позволяет штамповать детали из полированных и лакированных заготовок без повреждения поверхности. Кроме того, магнитноимпульсная штамповка обеспечивает возможность точного дозирования мощности импульсного разряда; возможность деформирования заготовок за несколько разрядов, причем первые импульсы служат для разогрева заготовки и повышения ее пластичности.

Область применения магнитноимпульсной штамповки обширна. С ее помощью можно выполнять разделительные, формообразующие и сборочные операции. Особенно эффективна магнитноимпульсная штамповка при обработке заготовок из труднодеформируемых сплавов. Максимальный диаметр заготовок достигает 300 мм при толщине стенки 3,5 мм.

Недостатком магнитноимпульсной штамповки является низкий КПД (3-10%), а также ограничения по толщине заготовки.

### **1.20. Технологичность конструкций из листового материала**

Под *технологичностью* понимают такое сочетание конструктивных элементов, которое обеспечивает наиболее простое и экономичное изготовление деталей при соблюдении технических и эксплуатационных требований к ним.

Основными показателями технологичности штампованных деталей являются:

- минимальный расход материала;
- минимальное количество и низкая трудоемкость операций;
- отсутствие последующей механической обработки;
- минимальное количество оборудования, технологической оснастки и производственных площадей.

В большинстве случаев основным критерием технологичности конструкции является экономное расходование материала при минимальном количестве операций и снижении трудоемкости. Анализ себестоимости штампованных деталей показывает, что экономия материала на 10% по эффективности равна увеличению производительности на 300% на всех операциях, а экономия материала на 20-25% превышает величину заработной платы.

*Общие технологические рекомендации к конструкции штампованных деталей:*

- механические свойства листового материала должны соответствовать не только требованиям прочности и жесткости изделия, но также процессу формообразования и характеру пластических деформаций;
- необходимо учитывать возможность применения для формоизменяющих операций более пластичного, хотя и менее прочного металла, так как в процессе холодной штамповки происходит его наклеп, значительно увеличивающий характеристики прочности материала;
- при расчете на прочность не следует завышать толщину листового металла, учитывая упрочнение его в процессе холодной деформации и достаточно высокую жесткость штампованных деталей;
- необходимо стремиться к созданию легких и облегченных конструкций деталей, применяя для увеличения жесткости штамповку ребер жесткости, отбортовку, загибку фланцев, закатку кромок и т. п., а также замену тяжелых стан-

дартных прокатных профилей более легкими — гнутыми или свернутыми профилями из листового металла;

конфигурация детали или ее развертки должна обеспечивать максимальное использование листового материала, давая возможность применить малоотходный или безотходный раскрой. Для получения безотходного раскроя не следует искусственно увеличивать размеры и площадь заготовки;

если отход неизбежен, то желательно придать ему конфигурацию, соответствующую другой детали, или использовать его вторично;

необходимо унифицировать и уменьшить ассортимент применяемых толщин и марок листового металла;

необходимо соблюдать кратность размеров крупных штучных заготовок размерам листа, иначе отходы значительно увеличиваются;

следует широко применять технологичные штамповочные конструкции взамен литых, кованных или клепаных изделий;

необходимо стремиться к уменьшению количества отдельных деталей, заменяя их цельноштампованными, что обычно приводит к упрощению технологического процесса и экономии материала.

*Основные технологические рекомендации к конструкции плоских деталей,*

*получаемых вырубкой и пробивкой:*

- необходимо избегать сложных конфигураций с узкими и длинными вырезами контура или очень узкими прорезями ( $b \leq 2S$ );

- при применении цельных матриц сопряжения в углах внутреннего контура необходимо выполнять с радиусом закругления  $r \geq 0,5S$ . В случае применения составных матриц сопряжения сторон делать без закруглений;

- сопряжения сторон наружного контура следует выполнять с закруглениями лишь в случае вырубки детали по всему контуру. Для возможности применения безотходного раскроя следует, наоборот, допускать сопряжения сторон под прямым углом;

- следует избегать вырубки длинных и узких деталей постоянной ширины при  $b \leq 3S$ , заменяя вырубку расплющиванием проволочных заготовок;

- минимальные размеры пробиваемых отверстий назначаются по табл. 1.15;

- минимальное расстояние от края отверстия до прямолинейного наружного контура должно быть не менее  $S$  для фигурных круглых отверстий и не менее  $1,5 S$ , если края отверстий параллельны контуру детали;

Таблица 1.15

Минимальные размеры отверстий, получаемых пробивкой

| Материалы            | Обычная пробивка свободным пуансоном |               | Пробивка пуансоном в зажатом состоянии материала |               |
|----------------------|--------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------|---------------|
|                      | круглым                              | прямоугольным | круглым                                          | прямоугольным |
| Твердая сталь        | $1,3S$                               | $1,0S$        | $0,5S$                                           | $0,4S$        |
| Мягкая сталь         | $1,0S$                               | $0,7S$        | $0,35S$                                          | $0,3S$        |
| Алюминий             | $0,8S$                               | $0,5S$        | $0,3S$                                           | $0,28S$       |
| Текстолит и гетинакс | $0,4S$                               | $0,35S$       | $0,3S$                                           | $0,25S$       |

- не следует располагать отверстия в заготовке, подлежащей гибке, близко к радиусу закругления детали. Наименьшее расстояние от края отверстия до загнутой полки должно составлять  $a \geq r + 2S$ , где  $r$  — радиус изгиба;
- в вытянутых деталях, имеющих отверстия в дне или фланце, пробиваемые после вытяжки, расстояние  $c$  от стенки детали до края отверстия должно быть  $c \geq r + 0,5S$ , где  $r$  — радиус закругления дна или фланца;
- минимальное расстояние между отверстиями при одновременной их пробивке должно быть равно  $b = (2+3)S$ .

*Основные технологические рекомендации к конструкции изогнутых деталей:*

- минимально допустимые радиусы гибки следует применять лишь в случае конструктивной неизбежности. В большинстве случаев можно применить увеличенные радиусы гибки  $r \geq S$ , а для толстых заготовок еще большие:  $r \geq 2S$ ;
- в случае гибки пластичных металлов (сталь 10, 20) с малым радиусом закругления ( $r \leq 2S$ ) линию изгиба желательно располагать поперек волокон проката. В случае гибки тех же металлов с радиусом  $r \geq S$  расположение линии изгиба безразлично; решающее значение при этом имеет достижение наиболее выгодного раскроя металла;
- при гибке твердых и малопластичных металлов (бронза, сильно наклепанный латунь, лента пружинной стали и др.) линию изгиба следует располагать

обязательно поперек волокон проката. Минимальный радиус изгиба назначается в пределах от 2 до 4 S;

при изгибе заготовки в разных направлениях, а также при изготовлении правых и левых деталей из одной заготовки радиус закругления одного из перегибов должен быть увеличен. Гибка должна быть произведена таким образом, чтобы сторона с заусенцами пришлась на наружную сторону перегиба с увеличенным радиусом.

для увеличения жесткости гнутых деталей и устранения упругого пружинения рекомендуется штамповка ребер жесткости поперек угла изгиба;

если конструкция сборочного узла требует прилегания боковых полок и основания изогнутой скобы (с внутренней стороны) к другим деталям, вместо гибки под острым углом рекомендуется делать гибку с поднутренным закруглением в углах;

наименьшая высота отгибаемой полки должна быть  $h \geq 3S$ ;

- в случае многооперационной гибки необходимо предусматривать технологические базы для фиксирования заготовок на операциях.

*Основные технологические требования к конструкции полых де-*

*талей, изготовленных вытяжкой и формовкой:*

- необходимо по возможности избегать весьма сложных и несимметричных форм вытягиваемых деталей, прибегая к ним лишь в случае явной конструктивной необходимости;

радиусы закруглений у фланца должны быть по возможности больше, а радиусы закругления у дна могут быть взяты меньшими:  $r \geq (2 + 4) S$ . Сопряжение стенок с дном без радиуса закругления может быть выполнено путем дополнительной калибровки или при штамповке весьма толстых заготовок ( $D/S \leq 20$  при  $m > 0,7$ );

- необходимо избегать глубоких вытяжек с широким фланцем ( $D > 3d$  при  $h \geq 2d$ ), требующих большого количества операций;
- полуоткрытые несимметричные формы полых деталей нужно проектировать, учитывая возможность спаренной вытяжки с последующей разрезкой на две детали;
- в прямоугольных коробках следует избегать острых углов в плане и у дна детали, кроме случаев изготовления коробок методом холодного выдавливания;

- при вытяжке полых деталей сложной конфигурации необходимо предусматривать те или иные технологические базы для фиксации заготовки на операциях.

### **1.21. Разработка технологического процесса**

Разработка технологических процессов листовой штамповки состоит из следующих этапов:

- ♦ анализ технологичности формы и конструктивности элементов детали;
- ♦ определение формы и размеров заготовки, а также расхода материала при минимальном его использовании;
- ♦ выбор наиболее рационального технологического процесса, обеспечивающего изготовление требуемых деталей;
- ♦ установление типа, мощности и габаритов необходимого оборудования;
- ♦ определение трудоемкости изготовления штампуемых деталей, а также количества и разряда производственных рабочих и расценки на одну деталь.

При выборе наиболее рационального технологического процесса должны быть решены следующие вопросы:

- ♦ установление характера, количества и последовательности операций;
- ♦ выбор степени сложности (совмещенности) операций;
- ♦ установление количества одновременно штампуемых деталей;
- ♦ определение операционных размеров и установление операционных допусков.

Многообразие встречающихся на практике конфигураций и различных сочетаний конструктивных элементов вместе с разнообразными технологическими требованиями и экономическими предпосылками не позволяет установить типовое решение, применимое для любого случая. Поэтому могут быть даны лишь следующие общие принципы и технологические рекомендации:

1. Как правило, необходимо стремиться к наименьшему количеству операций и увеличению их производительности. Исключением может быть штамповка в мелкосерийном производстве в том случае, если уменьшение количества операций приводит к необходимости изготовления сложных дорогостоящих штампов.
2. При штамповке плоских деталей с большим количеством близко расположенных отверстий целесообразно производить пробивку отверстий рядами; пробивку большого числа боковых отверстий на вытянутых изделиях группами с автомати-



ческим поворотом изделия - за несколько ходов пресса, но с применением простых и стойких штампов; пробивку ряда боковых отверстий в крупных деталях – за одну операцию клиновым штампом.

- 3 В ряде случаев последовательность операций зависит от требуемой точности отдельных элементов изделия. Так, например, при изготовлении изогнутой детали с отверстиями в случае невысокой точности положения отверстий относительно базы пробивку их следует производить в плоской заготовке, в случае же высокой точности, превышающей погрешность при гибке, пробивку отверстий, как правило, следует производить после гибки.
- 4 При изготовлении сложноизогнутых деталей замкнутой или полузамкнутой конфигурации количество операций гибки и их совмещенность зависят от конфигурации деталей, требуемой точности и экономической целесообразности применения дорогих сложногибочных (клиновых, шарнирных и т. п.) штампов.
- 5 Количество последовательных операций вытяжки зависит от относительной глубины детали и определяется общеизвестными методами по оптимальной величине коэффициентов вытяжки.
- 6 В большинстве случаев после глубокой вытяжки необходимо производить обрезку края детали.
- 7 При повышенных требованиях к геометрической форме плоских деталей следует предусматривать их правку в штампах.
- 8 Для деталей, требующих повышенной чистоты поверхности среза, следует применять зачистку после вырубki или чистовую вырубку.
- 9 При изготовлении полых деталей с фланцем, но без дна следует отдать предпочтение операции отбортовки перед вытяжкой. В случае высокой стенки борта желательно применить неглубокую вытяжку с последующей пробивкой и отбортовкой дна или отбортовку с утонением стенок.
- 10 При изготовлении полых или гнутых деталей с острым углом вместо закругления необходимо после вытяжки или гибки применить операцию калибровки.

Наиболее сложным вопросом при разработке технологических процессов листовой штамповки является вопрос о степени совмещенности операций, т.е. о том, применять ли сложные и дорогие комбинированные штампы, выполняющие сразу несколько операций, или применять отдельную пооперационную штамповку простыми и более дешевыми штампами.

## 2. ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЗАГОТОВОК МЕТОДАМИ ОБЪЕМНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

### 2.1. *Общая характеристика процесса*

Методами объемного деформирования могут быть обработаны почти все металлы и сплавы. Для труднодеформируемых и малопластичных сплавов применяются способы специальной обработки. Номенклатура изделий, полученных обработкой давлением, исчисляется сотнями тысяч. Обработанный давлением металл после термической обработки имеет высокие механические характеристики (ударную вязкость, относительное удлинение, усталостную прочность), значительно превосходящие соответствующие характеристики литейного металла.

Основными процессами формообразования заготовок являются штамповка на молотах, прессах, горизонтально-ковочных машинах; прессование, вальцовка, раскатка и др. Объемным деформированием могут быть получены поковки из всех пластичных металлов весом от десятков граммов до нескольких тонн. Стоимость штампованных изделий с последующей механической обработкой резанием в 2 – 2,5 раза ниже стоимости изделий, обработанных только резанием.

По мере совершенствования обработки давлением получают заготовки, которые по параметрам шероховатости поверхности, точности линейных размеров соответствуют точению, фрезерованию и даже шлифованию. Специальные виды обработки (калибровка, выдавливание) обеспечивают получение готовых изделий, пригодных для сборки без дополнительной механической обработки.

Процессы обработки давлением характеризуются относительной малооперационностью (нагрев, деформация, обрезка облоя, охлаждение), высокой производительностью, большой металлоемкостью и энергоемкостью. Эффективность применения новых технологических процессов обработки давлением определяется стойкостью инструмента, доля которого в себестоимости заготовок составляет в среднем 5 – 8 %; в ряде случаев она достигает 40%.

Обеспечение высокой стойкости инструмента в условиях интенсификации производства и повышения требований к качеству заготовок возможно на базе расширения комплекса вопросов, включающих доводку конструкции и геометрии инструмента; создание высокопрочных, жаростойких и износостойких инструмен-

плотных материалов и покрытий: эффективных смазок и охлаждающих жидкостей; разработку прогрессивных технологий обработки инструмента.

## 2.2. Исходные материалы

Исходными стальными заготовками для горячей обработки давлением являются слитки, обжатые болванки (блумсы), сортовой прокат и индивидуальные заготовки.

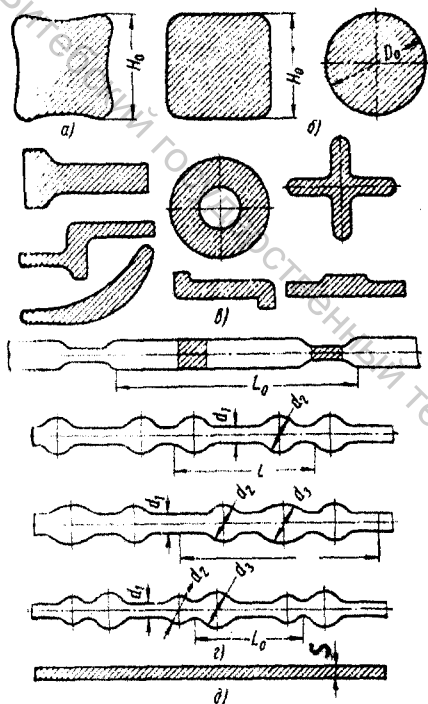


Рис 2.1. Типы прокатных профилей, применяемых дляковки и штамповки:

а – обжатая болванка; б – сортовой прокат; в – профильный прокат; г – прокат периодического профиля; д – полосовая заготовка

$H_0$  – сторона квадрата,  $D_0$  – диаметр заготовки,  $L$  – длина периода заготовки,  $S$  – толщина полосы

Слитки являются заготовками для кованых крупных поковок. В зависимости от габаритных размеров и конструкций изделий вес слитка может составлять 1,2 – 350 тонн. Слитки изготавливаются в форме усеченной пирамиды. Поперечное сечение бывает квадратным, круглым, многоугольным.

Слитки отличаются химической неоднородностью по объему и содержат значительное количество дефектов: усадочную рыхлость, трещины, газовые пузыри, неметаллические включения.

Обжатая болванка в поперечном сечении представляет квадрат с вогнутыми гранями и закругленными ребрами (рис. 2.1, а). Размеры  $H_0$  стороны болванок составляют 140—450 мм с допусками от  $\pm 5$  до  $\pm 10$  мм при минимальной длине 1 м и максимальной 6 м. Этот вид заготовки может применяться для относительно больших поковок.

**Сортовой прокат** (рис. 2.1, б). К нему относится катаная заготовка квадратного и круглого сечения. Размеры квадратного сечения (размеры сторон) 6—250 мм, при торговой длине 2—6 м и круглого сечения заготовки (диаметр) 5—200 мм.

**Профильный прокат** (рис. 2.1, в) имеет разнообразную форму сечения. Применение профильного проката связано с сокращением подготовительных операций при штамповке. При использовании такого проката удастся значительно упростить процесс штамповки, при этом стоимость поковок обычно снижается.

**Прокат периодического профиля** (рис. 2.1, г) имеет неодинаковые поперечные сечения по длине. Получают его продольной прокаткой или поперечной прокаткой на специальных станах. Прокат периодического профиля находит применение в крупносерийном и массовом производстве фасонных поковок.

| Тип заготовки | Заготовка простого профиля | Фасонная заготовка  |                                        |
|---------------|----------------------------|---------------------|----------------------------------------|
|               |                            | постоянного профиля | переменного или периодического профиля |
| Штуцная       |                            |                     |                                        |
| Спаренная     |                            |                     |                                        |
| Многоштыковая |                            |                     |                                        |

**Полосовая заготовка** (рис. 2.1, д) для горячей штамповки применяется толщиной более 5 мм. Наибольшее распространение получила углеродистая полосовая сталь. Также применяются конструкционная, специальная, качественная и высококачественная стали.

**Индивидуальные заготовки по профилю** подразделяются на простые и фасонные (рис. 2.2). К заготовкам простого профиля относятся круглые, квадратные и прямоугольные заготовки.

Рис. 2.2 Классификация заготовок:  $H_0$ ;  $D_0$ ;  $L_0$

— размеры заготовок

Фасонные заготовки имеют переменное сечение по оси и более сложную конфигурацию, которая может быть получена литьем, ковкой, предварительной штамповкой, прокаткой или вальцовкой. Заготовки простого и фасонного профилей бывают штучными, спаренными и многштучными. По размерам заготовки подразделяются на мерные, кратные и произвольной длины.

### 2.3. Резка металла на заготовки

Резка на ножницах является наиболее дешевым, производительным и распространенным способом разделения проката на мерные части. Однако, в силу различных причин, на поверхности заготовок возникает ряд характерных дефектов и, в первую очередь, искажения концов заготовки.

Схема процесса резки на ножницах представлена на рис. 2.3.

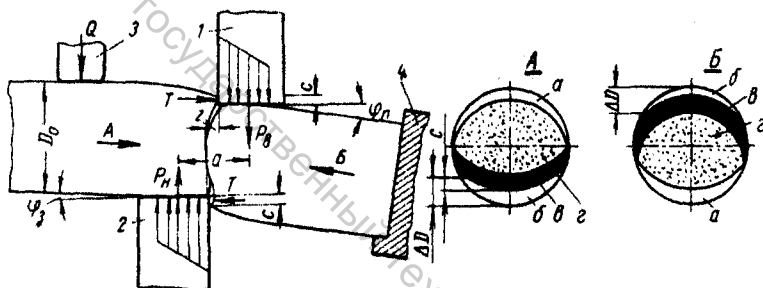


Рис. 2.3 Механизм процесса резки пруткового металла:

а -- зоны смятия металла торцами ножей с образованием блестящего пояса; б -- зоны утяжки; в -- зоны внедрения ножей; г -- зоны скола;

1 -- подвижный нож; 2 -- неподвижный нож; 3 -- прижимное приспособление; 4 -- упор.

В момент вдавливания ножей 1 и 2 в пруток в нем возникают упругие деформации. Под действием смежно расположенных ножей образуется пара сил с моментом  $P_a$ , стремящаяся повернуть и изогнуть пруток, вследствие чего каждый нож касается прутка только частью рабочей поверхности, под которой металл подвергается смятию. При этом имеет место неравномерное распределение напряжений смятия, которые возрастают вследствие увеличения степени и сопротивления деформации по мере приближения к режущей кромке ножа. Повороту прутка, продвинутого до упора 4, препятствует сила  $Q$  прижимного приспособления 3 ножниц, поэтому угол  $\varphi_3$  незначителен. В момент, когда напряжения от действия ножей больше сопротивления пластической деформации металла, происходит внедрение ножей в пруток на величину  $c$ ; при этом по месту реза образуют-

ся блестящий пояс. Внедрение ножей сопровождается утяжкой соседних с ножами участков металла. Так как на левую часть прутка действуют сила  $P_n$  нижнего ножа и сила  $Q$  прижима, препятствующая повороту этой части прутка, а на правую — отрезаемую часть прутка — сила  $P_v$ , способствующая повороту конца прутка на угол  $\varphi_n$ , то угол  $\varphi_n > \varphi_v$ . Эти углы, характеризующие неодинаковое смятие металла верхним и нижним ножами, называют углами смятия. Очевидно, что с учетом силы  $Q$  и массы прутка силы, действующие со стороны верхнего и нижнего ножей, тоже неодинаковы ( $P_v < P_n$ ).

При достижении максимально возможной для данной стали величины внедрения ножей  $\Delta D$  (виды А и Б) образуются встречные трещины, профиль которых виден слева на рис. 2.3. Эти трещины иногда называют опережающими, так как они опережают движение ножа.

При нормальной величине зазора  $z$  между ножами противоположные трещины сходятся, образуя сплошную криволинейную поверхность отделения заготовки от прутка. Если зазор  $z$  меньше оптимального, то направления трещин не сходятся и образуется новая трещина, которая соединяет концы двух предыдущих, что приводит к появлению козырьков на срезанной поверхности. При штамповке такой заготовки получаются складки.

При резко выраженной концентрации напряжений наблюдается понижение пластичности и преобладает хрупкое разрушение металла. Это объясняется тем, что местные напряжения вблизи надреза могут превысить предел прочности раньше, чем среднее напряжение в сечении достигнет предела текучести металла; при этом образуется трещина и почти мгновенное разрушение образца без значительной пластической деформации.

Скорость распространения трещин в подобных случаях достигает 1000 м/сек, что составляет примерно 0,2 от скорости распространения упругой волны в стали. Эти явления используются для разделки прутков на мерные заготовки при помощи хладноломов (рис. 2.4, а), представляющих собой устройство, состоящее из двух опор 1, 2, установленных на расстоянии  $l_0$ , и ломателя 3, между которыми размещается прут, подлежащий ломке. При ломке прутка в вертикальной плоскости ломатель 3 может быть расположен над прутком и под ним. По условиям безопасности работы рекомендуется ломатель устанавливать под прутком. По

Этой же причине для хладнолома предпочитают использовать вертикальные прессы.

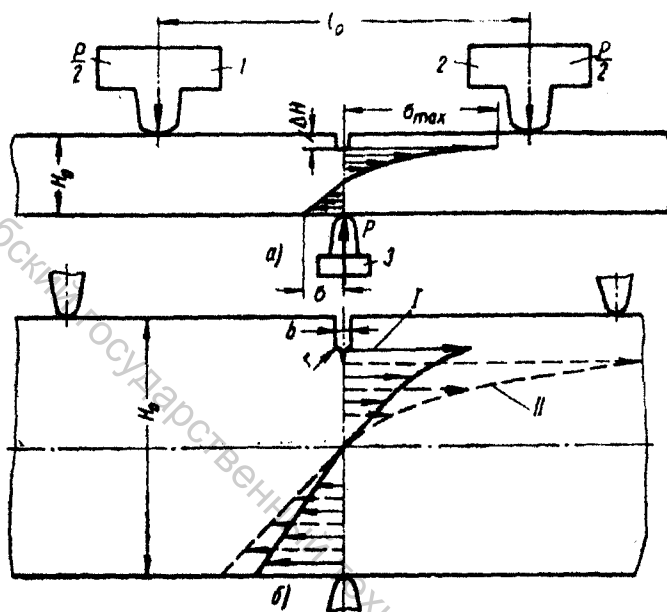


Рис. 2.4. Схема устройства хладнолома (а) и эпюры концентрации напряжений (б): I — эпюра напряжений в начале нагружения; II — эпюра напряжений в момент ломки прутка; 1, 2 — опоры; 3 — ломатель

Перед ломкой прутки размечают и надрезают. При ломке прутка надрез должен находиться с противоположной стороны ломающей посередине между опорами во избежание появления косины и значительной волнообразности контура излома. Под действием силы  $P$  вблизи надреза возникают растягивающие напряжения, которые, концентрируясь и возрастая в опасном сечении (см. эпюры напряжений на рис. 2. 4, б)), обеспечивают ломку прутка почти без пластической деформации. В этом случае рабочий ход равен не более 5—10% от величины  $H_0$ .

Большое значение для ломки имеют форма и размеры надреза: чем уже надрез и чем меньшим радиусом он выполнен при данной глубине, тем в большей степени проявляется концентрация напряжений и тем больший эффект. Максимальное растягивающее напряжение  $\sigma_{max}$  у нижнего края надреза глубиной  $\Delta H$ ,

выполненного радиусом  $r$  и шириной  $b$ , равной двойному радиусу, достигает величины

$$\sigma_{\max} = 2\sigma \sqrt{\frac{\Delta H}{r}}, \quad (2.1)$$

где  $\sigma$  — напряжение при отсутствии концентрации напряжений;  $\Delta H$  — глубина надреза;  $r$  — радиус закругления надреза.

**Газовая резка.** Сущность способа заключается в местном нагреве газовой струей металла выше температуры плавления. При этом металл интенсивно окисляется и частично сгорает.

Газовой резке поддаются лишь те металлы, которые удовлетворяют следующим основным условиям.

1. Температура воспламенения металла должна быть выше температуры плавления (условие возможности осуществления процесса). За температуру воспламенения принимают температуру, при которой металл интенсивно окисляется струей кислорода, действующей на его нагретую поверхность. Высококачественная газовая резка возможна при сгорании металла в твердом состоянии. Сталь, содержащая углерода более 0,7%, при резке одновременно горит и расплавляется, вследствие чего полость раздела получается широкой, а поверхность неровной.

2. Окислы металла должны быть жидкотекучими и обладать более низкой температурой плавления, чем металл (условие, обеспечивающее выдувание шлака из зоны реза в жидком состоянии).

3. Энергия, выделяющаяся при сгорании металла, вместе с тепловой энергией газового пламени должна быть достаточной для поддержания нагрева на уровне температуры воспламенения в течение всего периода резки (условие, необходимое для непрерывности процесса резки).

4. Теплопроводность металла должна быть минимальной (условие, способствующее локализации тепла в зоне реза).

5. В металле должно быть ограниченное содержание элементов, ухудшающих процесс резки (табл. 2.1).

Высоколегированные хромистые, хромоникелевые, вольфрамовые и другие стали не удовлетворяют перечисленным условиям и поддаются лишь кислородно-флюсовой резке.



Таблица 2.1

Влияние содержания химических элементов в стали на процесс резки

| Элемент       | Содержание элемента в %                    | Оценка влияния элемента                                                                                                                                                        |
|---------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Углерод       | До 0,4<br>0,4 – 0,6<br><br>Св. 0,7         | Резка не затрудняется.<br>Резка проходит удовлетворительно, но возможно образование структур с повышенной твердостью (закалка) и появление трещин.<br>Резка сильно ухудшается. |
| Марганец      | До 4<br>4 – 13                             | Резка не затрудняется.<br>Резка проходит удовлетворительно.                                                                                                                    |
| Хром          | 2 – 3<br>Св. 5                             | Резка затрудняется.<br>Резке без флюса не поддается.                                                                                                                           |
| Никель        | Св. 20                                     | Резка не затрудняется                                                                                                                                                          |
| Кремний       | До 4                                       |                                                                                                                                                                                |
| Молибден      | До 0,25<br>Св. 0,5                         | Резка протекает удовлетворительно.<br>Резка сильно затрудняется.                                                                                                               |
| Вольфрам      | До 10<br><br>10 – 20<br>Св. 20             | Резка замедляется (уменьшается скорость резки).<br>Резка затрудняется.<br>Резке без флюса не поддается.                                                                        |
| Сера и фосфор | Пределы по стандарту (сотые доли процента) | Резка не затрудняется.                                                                                                                                                         |

Процесс кислородно-флюсовой резки отличается от кислородной тем, что в зону раздела, кроме кислорода, вводится флюс (обычно железный порошок). Флюс, сгорая, повышает температуру в полости раздела, а продукты горения флюса, переходя в шлаки, снижают температуру плавления последних, благодаря чему они в жидком виде легко удаляются кислородной струей.

Структура металла вдоль линии реза отлична от структуры основного металла. В малоуглеродистых сталях в зоне нагрева наблюдается рост зерна. Участки, более удаленные от линии реза, но расположенные в зоне термического влияния, приобретают сравнительно мелкозернистое строение, подобно структуре нормализованной стали. При резке малоуглеродистой стали структурные изменения, как правило, не оказывают существенного влияния на качество металла.

Резка высокоуглеродистой и легированной стали сопровождается образованием в зоне термического влияния структур с повышенной твердостью вследствие закалки. Глубина зоны термического влияния возрастает с увеличением содержания углерода в стали. Изменение твердости стали зависит также и от спо-

соба резки. Для уменьшения отрицательного влияния газовой резки (закалка кромок, трещинообразование) применяют сопутствующий подогрев и замедленное охлаждение. Благодаря сопутствующему подогреву уменьшается скорость охлаждения зоны термического влияния, а вместе с тем и степень закалки стали. Скорость охлаждения уменьшают также и тем, что разрезанные части металла раздвигают не сразу после окончания процесса резки, а через некоторое время, благодаря чему уменьшается интенсивность теплоотдачи. Снятие напряжений и уменьшение твердости достигается в необходимых случаях соответствующей термообработкой металла после резки.

*Резка пилами.* Описанные выше способы резки не обеспечивают достаточно точных размеров заготовок. Нормальный допуск на длину заготовки, полученной резкой или ломкой, составляет несколько миллиметров. Однако часто требуется получить заготовки с более высокой точностью и ровным торцом, перпендикулярным оси прутка. Таким требованиям отвечают заготовки, полученные резкой зубчатыми пилами.

Зубчатые пилы подразделяются на ленточные и дисковые. Ленточные пилы могут иметь форму бесконечной (с соединенными концами) и конечной ленты (ножовочные пилы). В последнем случае пила совершает возвратно-поступательное движение.

Дисковые пилы имеют различные размеры (300—1800 мм по диаметру). Толщина дисков определяет минимальные потери металла на пропиловку. Разводка зубьев пил уменьшает потери энергии на трение боковой поверхности диска о металл, но приводит к увеличению ширины пропиловки, т. е. к увеличению отходов металла.

Применение дисков со вставными зубьями приводит к большим потерям металла на пропиловку по сравнению с цельными дисками. Окружная скорость резания холодными пилами составляет 0,5—1,0 м/сек, что намного ниже скоростей при обработке резцами (более 15 м/сек). Основным недостатком резания пилами в холодном состоянии является малая производительность. Пилы для горячей резки, применяемые в прокатном производстве, имеют окружную скорость 90—110 м/сек, так что длительность резки даже крупных профилей не превышает 5—20 сек. При температуре 700° С за 1 сек разрезается пруток площадью 2000 мм<sup>2</sup> (Ø 45 мм).

*Анодно-механическая резка* предусматривает использование электрической дуги между разрезаемым прутком (анод) и вращающимся дисковым инструментом (катод). Генератор постоянного тока включается в общую цепь.

При наличии тока в цепи сближение электродов (прутка и диска) вызывает электрическую дугу, которая горит в среде рабочей жидкости. Температура в зоне дугового разряда достигает  $4000\text{—}5000^\circ\text{C}$ . Что вполне достаточно для расплавления любого металла. Благодаря световому поглощению жидкости, дуга не оказывает вредного слепящего воздействия и наблюдается в виде красноватой полосы.

При анодно-механической резке режущий диск совершает вращательное (около  $15\text{—}25\text{ м/сек.}$ ) и поступательное движение. Подача диска автоматизирована, при этом выдерживается оптимальная величина межэлектродного зазора. Кроме дискового, применяется и ленточный инструмент. Толщина стальных дисков и лент равна  $0,5\text{—}2,5\text{ мм}$ . Износ инструмента при анодно-механической резке составляет  $15\text{—}25\%$  от объема прорезанного слоя металла.

В качестве рабочей жидкости при резке металла применяют водный раствор жидкого стекла. Расход рабочей жидкости составляет  $5\text{—}25\text{ л/мин}$ .

#### **2.4. Термический режим объемного деформирования заготовок**

Горячее деформирование заготовок ( $750 - 1300^\circ\text{C}$ ) можно рассматривать как совместные процессы обработки металлов давлением и термического воздействия на них. В общем случае решают две основные задачи:

- придание заготовке заданной формы и размеров;
- формирование оптимальной зернистости металла при минимальных остаточных напряжениях.

Тепловое воздействие на металл приводит к почти полной потере упругих свойств и уменьшению (в десятки раз) его сопротивления деформации и к повышению (на десятки процентов) пластичности. В процессе горячей обработки давлением происходит снятие возникающих напряжений (релаксация). Кроме того, тепловое воздействие на металл приводит к перекристаллизации и растворению карбидов, способствует и ускоряет диффузионные и релаксационные процессы.

К числу наиболее вредных явлений, вызываемых нагревом, относятся окалинообразование, обезуглероживание, перегрев металла. При неправильном ведении процесса происходит пережог металла и образование трещин вследствие

вие тепловых растягивающих напряжений. Особенно опасен в этом отношении процесс охлаждения металла.

Термический режим обработки давлением включает три этапа:

- нагрев металла;
- остывание металла в процессе обработки при одновременном переходе энергии деформации в тепловую;
- остывание металла по окончании обработки.

Различают оптимальный и технологически необходимый интервалы температур обработки. Оптимальный интервал температур определяют в результате раздельного установления температур начала и конца обработки. Точно установить эти температуры можно на основании конкретных данных, касающихся металла (с металлургической, металловедческой и эксплуатационной точек зрения). Обычно указывают ориентировочные температуры начала и конца обработки, которые затем подлежат уточнению, исходя из конкретных обстоятельств.

Вблизи температуры плавления металла находится температура потери его пластичности. В этой же температурной зоне происходит пережог металла, связанный с оплавлением и окислением границ зерен, поэтому деформировать металл при указанных температурах не представляется возможным.

Ниже температуры плавления находятся температуры перегрева металла, который характеризуется значительным ростом зерен, однако крупнозернистая структура большинства марок стали хорошо подвергается обработке, а в процессе деформирования зерна измельчаются, так что максимальная температура обработки может находиться в области температур нагрева, который начинается при температуре критического роста зерна.

При определении нижней температурной границы необходимо учитывать тип стали (заэвтектоидная или доэвтектоидная, объем поковки, качество требуемого металла, наличие или отсутствие термообработки, способ охлаждения). Если предусмотрена термическая обработка, например, закалка с последующим отпуском, то правильно выбранная температура конца обработки позволяет использовать тепло нагретой заготовки для последующей термической обработки.

Несмотря на то, что при высокой температуре конца обработки зерно будет крупным, можно в результате быстрого охлаждения получить тонкое строение структуры сплава и соответствующие этому механические свойства. Высокая тем-

Температура конца обработки способствует повышению технико-экономических показателей.

Максимальный интервал ковочных температур для низкоуглеродистой стали достигает 600 °С, для эвтектоидной стали он составляет 400 – 450 °С, а для перлитных – 200 – 300 °С. Для высоколегированной стали этот интервал еще меньше, и, например, для жаропрочной стали он составляет 100 - 150°С. В таблице 2.2. приведены температурные интервалы обработки некоторых углеродистых и легированных сталей.

Таблица 2.2

Температурные интервалыковки и штамповки некоторых углеродистых и легированных сталей

| Марка стали           | Температура началаковки<br>максимальная<br>в °С | Температура концаковки<br>в °С |         | Рекомендуемый интервал температурковки<br>в °С |
|-----------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------|---------|------------------------------------------------|
|                       |                                                 | Не выше                        | Не ниже |                                                |
| Ст 0, 1, 2, 3         | 1300                                            | 800                            | 700     | 1280-750                                       |
| 40, 45, 50            | 1260                                            | 850                            | 760     | 1200-800                                       |
| 15Г, 20Г, 25Г, 30Г    | 1250                                            | 850                            | 750     | 1230-800                                       |
| 40ХГ                  | 1200                                            | 870                            | 800     | 1180-830                                       |
| 30ХМ, 30ХМА, 35ХМ     |                                                 |                                |         |                                                |
| 30ХГС, 30ХГСА, 35ХГСА | 1180                                            | 870                            | 800     | 1140-830                                       |
| ШХ15СГ                | 1180                                            | 900                            | 800     | 1150-850                                       |

**Полугорячая штамповка.** Одним из путей снижения энергетических затрат является применение полугорячей штамповки, сущность которой заключается в том, что металл перед деформированием нагревают до температуры, находящейся в области критических точек перлитного превращения. На основании производственного опыта интервал температур полугорячей штамповки принимают 600 - 800 °С. В области этих температур еще не происходит интенсивное окисление и окалинообразование на поверхности заготовки, а усилия деформирования снижаются в 1,5 – 2 раза по сравнению с холодным деформированием.

Интервал температур полугорячей объемной штамповки определяют в зависимости от марки стали, скорости деформирования и допускаемых усилий на инструмент.

Полугорячая деформация по сравнению с горячей позволяет:

- изготавливать поковки повышенной геометрической точности;
- исключить поверхностное окисление и структурные изменения в материале (фазовые превращения);

- увеличить прочностные характеристики из-за наличия деформационного упрочнения материала;
- уменьшить массу заготовок (в ряде случаев до 30%) за счет их приближения к массе деталей;
- сократить или полностью ликвидировать операции резанием, а в некоторых случаях и термической обработки.

Скорость нагрева оказывает двойственное влияние на качество металла. Чем выше скорость нагрева, т.е. меньше его продолжительность, тем меньше окисление и обезуглероживание поверхности. Однако при чрезмерно быстром нагреве в результате значительного температурного градиента по сечению заготовки в металле могут возникать термические напряжения, которые в некоторых случаях могут приводить к образованию микро- и макротрещин.

Технически возможная скорость нагрева зависит от температурного напора, т.е. от разности между температурой печи и средней температурой поверхности заготовки. Температура печи и конечная разность температур печи и нагрева заготовки являются основными факторами, при помощи которых можно регулировать скорость нагрева. Время нагрева заготовок из углеродистой стали приведено в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Время нагрева (мин) кованых и катаных заготовок из углеродистой конструкционной стали при одиночном расположении в печи

| Диаметр или сторона квадрата в мм | Температура рабочего пространства в °C |                      |              |                      |              |                      |              |                      |              |                      |              |                      |
|-----------------------------------|----------------------------------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|
|                                   | 1200                                   |                      |              |                      | 1300         |                      |              |                      | 1400         |                      |              |                      |
|                                   | Температура нагрева в °C               |                      |              |                      |              |                      |              |                      |              |                      |              |                      |
|                                   | 1100                                   |                      | 1150         |                      | 1200         |                      | 1250         |                      | 1200         |                      | 1250         |                      |
|                                   | Профиль заготовки                      |                      |              |                      |              |                      |              |                      |              |                      |              |                      |
|                                   | круг-<br>лый                           | квад-<br>рат-<br>ный | круг-<br>лый | квад-<br>рат-<br>ный | круг-<br>лый | квад-<br>рат-<br>ный | круг-<br>лый | квад-<br>рат-<br>ный | круг-<br>лый | квад-<br>рат-<br>ный | круг-<br>лый | квад-<br>рат-<br>ный |
| 10                                | 2,7                                    | 3,3                  | 3,0          | 3,5                  | 2,0          | 2,5                  | 2,0          | 3,0                  | 1,0          | 1,5                  | 1,0          | 1,5                  |
| 50                                | 12,5                                   | 16,0                 | 15,0         | 19,5                 | 8,0          | 10,5                 | 10,5         | 13,5                 | 4,5          | 5,5                  | 4,5          | 5,5                  |
| 100                               | 26,0                                   | 33,5                 | 31,0         | 40,0                 | 18,0         | 23,0                 | 21,0         | 27,5                 | 9,0          | 11,5                 | 10,5         | 13,0                 |
| 150                               | 42,5                                   | 55,0                 | 50,0         | 65,0                 | 30,0         | 39,0                 | 35,0         | 45,5                 | 15,5         | 20,0                 | 17,0         | 22,0                 |
| 200                               | 62,5                                   | 81,0                 | 72,5         | 94,0                 | 46,0         | 60,0                 | 53,5         | 69,0                 | 22,5         | 29,0                 | 24,5         | 32,0                 |

*Средства снижения окисления при нагреве.* Уменьшение окисления при нагреве достигается:

- сокращением продолжительности нагрева;
- нагревом в защитных атмосферах;
- нагревом в продуктах неполного горения газообразного топлива;
- нагревом в расплавленных солях или расплавленном стекле;
- применением обмазок.

Первые два способа позволяют сократить потери от угара, но не ликвидируют их; остальные дают возможность полностью или почти полностью ликвидировать угар.

Нагрев заготовок в расплавленных солях или в расплавленной стекломассе позволяет полностью ликвидировать окисление при нагреве. Расплавленное стекло растворяет имеющуюся на поверхности заготовки окалину и обеспечивает смазку при последующей обработке.

Близким к нагреву в расплавленном стекле является нагрев с применением защитных покрытий и обмазок. Для приготовления обмазок используют смесь порошков двух, трех и более стекол, к которым добавляют до 30% тонкомолотого стекла, а также небольшое количество сульфитного щелока и огнеупорной глины, которые обеспечивают хорошее прилипание обмазки к поверхности холодного металла. Полученную эмульсию наносят на поверхность заготовки кистью или окунанием.

## **2.5. Использование сверхпластичности металлов и сплавов в обработке давлением**

*Сверхпластичность* — это способность материалов равномерно пластически деформироваться с очень большой степенью деформации при относительно высоких температурах и малых скоростях деформации. Например, двухфазный сплав ВХЧ на основе хрома при температуре 1000°C и скорости растяжения 3 мм/мин равномерно удлиняется без разрушения и без образования шейки до 300 %.

На конференции в 1991 г. (г. Осака) были сообщения о рекордных результатах, характеризующих сверхпластичность различных материалов. В частности, рекордное удлинение 8000% было получено при испытании на растяжение образцов из промышленной алюминиевой бронзы. Среди керамических материалов наибольшее удлинение (800%) показал диоксид циркония.

Состояние сверхпластичности определяется совокупностью ряда признаков: повышенной чувствительностью напряжения течения материала к изменению скорости деформации; крайне незначительным деформационным упрочнением; аномально высоким ресурсом деформационной способности. Напряжения течения материала в состоянии сверхпластичности в несколько раз меньше предела текучести, характеризующего пластическое состояние данного материала.

По структурному признаку принято различать две разновидности сверхпластичности: одна разновидность проявляется у металлов и сплавов с особо мелким зерном ( $d < 10$  мкм), а вторая разновидность проявляется у металлов и сплавов в процессе фазовых превращений, при этом исходный размер зерен не имеет значения.

Первую разновидность сверхпластичности называют *структурной*. Ее отличительными особенностями являются зависимость эффекта от исходного размера зерен и почти неизменное структурное состояние материала в процессе деформации. При этом необходимо, чтобы зерна имели приблизительно равноосную форму, а в процессе нагрева до температуры деформации обладали достаточной устойчивостью против роста. Наилучшие условия для предотвращения роста зерна — у двухфазных сплавов. В сверхмелкозернистое состояние сплавы переводят обычно предварительной термической или термомеханической обработкой.

Вторая структурная разновидность сверхпластичности наблюдается при деформации материала в процессе фазового превращения и характеризуется постоянным изменением фазового состава и структуры материала в процессе деформации.

Температурный интервал существования сверхпластичности довольно широк и может находиться в пределах от температуры начала рекристаллизации ( $0,4 T_{пл}$ ) до температур, близких к температуре плавления. Нижняя граница температурного интервала обусловлена важной ролью диффузионных процессов в механизме деформации сверхмелкозернистых материалов; верхняя граница соответствует температуре начала собирательной рекристаллизации. Однако, какой бы ни была разновидность сверхпластичности, деформация должна осуществляться в условиях постоянной температуры по объему заготовки и в течение всего процесса обработки.



Скорость деформации для обеспечения состояния структурной сверхпластичности должна быть, с одной стороны, достаточно малой, чтобы успевали в полном объеме протекать диффузионные процессы, с другой стороны, достаточно высокой, чтобы в условиях повышенных температур не допускать роста зерен

Ряд особенностей, характеризующих металлы в состоянии сверхпластичности, — чрезвычайно большая деформационная способность; малое напряжение течения; слабое влияние активных сред и отсутствие существенных изменений структуры материала заготовки в процессе сверхпластичности обеспечивает получение высококачественных анизотропных поковок.

Влияние сверхпластической деформации на микроструктуру, высокая релаксационная способность обеспечивают возможность значительного повышения эффективности процессов обработки металлов давлением (ОМД) и качества изделий.

Установлено, что сверхпластичные материалы являются упруговязкопластичными средами, и чем больше вклад вязкого течения в деформацию, тем сильнее проявляются признаки сверхпластичности и, прежде всего, способность к большим устойчивым деформациям при растяжении.

Одним из серьезных препятствий использованию сверхпластичности в обработке металлов давлением являются очень малые скорости деформации, при которых это состояние проявляется. Однако имеются сообщения о проявлении признаков сверхпластичности у алюминиевых и медных сплавов при скоростях, существенно превышающих скорости деформации, характерных для любых традиционных процессов ОМД, включая и штамповку взрывом.

Эти результаты позволяют по-новому оценить перспективы использования сверхпластичности в технологии обработки материалов давлением. Сопоставление указанных преимуществ, а также обобщение имеющегося опыта использования сверхпластичности позволяет выделить ряд технологических задач, при решении которых наибольший эффект обеспечивает деформирование в состоянии сверхпластичности. К таким задачам, прежде всего, относятся следующие:

1. Штамповка малопластичных и труднодеформируемых металлов и сплавов на основе никеля, титана, магния, алюминия, железа, тугоплавких металлов, которые отличаются высокой стоимостью, а их обработка — большой

трудоемкостью и многооперационностью. Увеличение деформационной способности материала в состоянии сверхпластичности позволяет существенно увеличить деформацию за один технологический переход и перейти к малооперационной технологии, что в значительной мере компенсирует уменьшение производительности за счет малых скоростей деформации.

2. Штамповка или другие способы формирования изделий, отличающихся особо сложной формой, получение которых часто недоступно для традиционных методов обработки металлов давлением (например, тонкостенные детали сложной формы с оребрением, замкнутые емкости сферической и более сложной формы и т.д.). Это дает возможность максимально приближать форму и размеры поковки к форме и размерам готовой детали; снижать до минимума или полностью исключить припуск на механическую обработку, добиваясь значительной экономии дорогостоящих металлов и сплавов, снижения трудоемкости механической обработки.

3. Снижение требуемых усилий штамповки и мощности применяемого оборудования. Малые давления при деформировании в состоянии сверхпластичности способствуют существенному увеличению стойкости штампового инструмента и позволяют заметно уменьшить его стоимость.

4. Улучшение ряда показателей качества готовой продукции. Повышенная текучесть и малые давления при штамповке сверхпластичных материалов способствуют более качественному воспроизведению формы ручья штампа; повышению точности размеров и снижению шероховатости поверхности поковок; уменьшению разброса размеров в пределах партии поковок. Высокая способность к релаксации напряжений материалов в состоянии сверхпластичности приводит практически к отсутствию внутренних напряжений в изделиях, а это обеспечивает стабильность размеров и форм готовых деталей; отсутствие короблений в процессе и после термообработки; повышенную стойкость металла детали против коррозии.

## **2.6. Объемная горячая штамповка в открытых штампах**

Объемной штамповкой получают поковки различной конфигурации – от простых по форме до очень сложных. Осуществляется объемная штамповка на молотах, кривошипных горячештамповочных и гидравлических прессах.

Штамповка в открытых штампах характеризуется тем, что штамп в процессе деформирования остается открытым (рис. 2.5). Зазор  $\Delta$  между подвижной 1 и

неподвижной 2 частями открытого штампа является величиной переменной. В этот зазор выдавливается облой, высота которого в процессе деформирования изменяется. Облой перекрывает выход, и оставшийся металл заполняет полость (ручей) штампа. Избыточный металл после заполнения всей полости штампа вытесняется в облойную канавку 3.

Размеры и формы канавок (рис. 2.6), в которых размещается облой, зависят от размеров и конфигурации поковок, поступающих в чистовой ручей. Правильно выбранные формы и размеры канавок обеспечивают заполнение рельефа полости штампа и вытеснение избыточного металла из ручья.

Облойная канавка имеет узкий выход из полости штампа и расширенную часть – магазин, предназначенный для свободного размещения вытесняемого металла. Для последующей обрезки облоя важно, чтобы сопряжение поковки с облоем было выполнено как можно более резко. Однако при небольшом радиусе закругления в месте перехода от поковки к облою раскаленный металл нагревает острый порог штампа, и он быстро изнашивается. Канавка теряет форму, что приводит к браку поковок. Поэтому на практике применяют более рациональные формы канавок, которые имеют увеличенный порог и магазин.

Недостаточная ширина порога вызывает деформацию штампа, а большая ширина порога приводит к повышенному расходу энергии на штамповку вследствие большого сопротивления образованию облоя и его деформации.

Нижняя часть штампа находится в соприкосновении с нагретым металлом более длительное время, чем верхняя, поэтому площадку нижнего порога предусматривают относительно большей ширины. Такие канавки применяются при большом объеме облоя, т.е. при изготовлении крупных или сложных по конфигурации поковок. Называются они канавками с двусторонним порогом (симметричная - рис. 2.6, а и несимметричная - рис. 2.6, б).

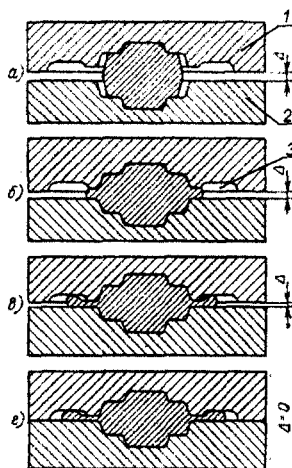


Рис. 2.5. Схема штамповки в открытом штампе:  
а – г – последовательность заполнения штампа; 1, 2 – соответственно подвижная и неподвижная часть штампа; 3 – облойная канавка

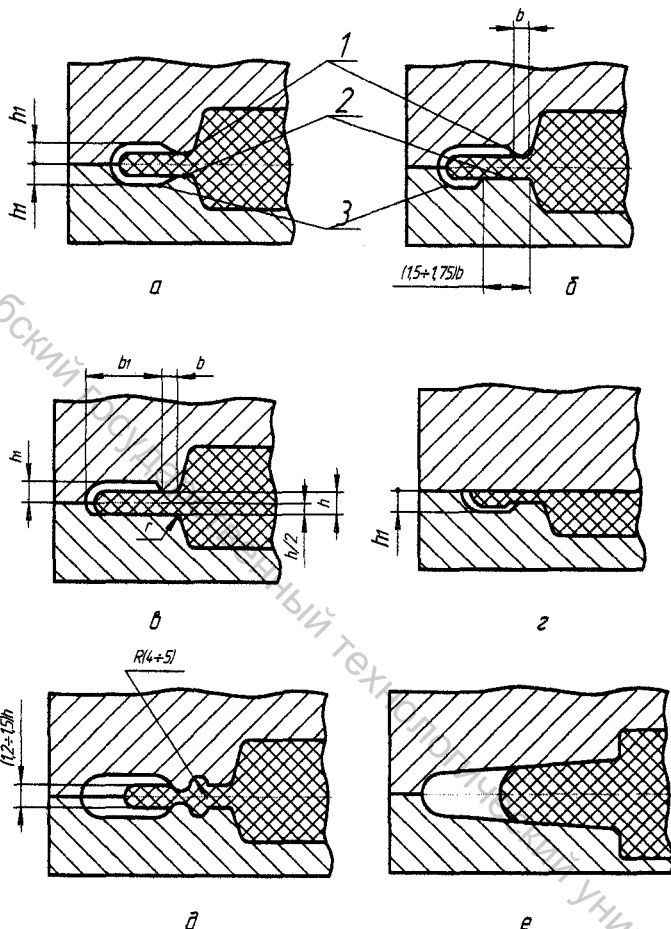


Рис. 2.6. Схемы облойных канавок: а, б – канавки с двусторонним порогом, соответственно симметричная и несимметричная; в, г – канавки соответственно с верхним и нижним порогами; д – канавка с повышенным сопротивлением течению металла; е – канавка с наклонными порогами; 1 – верхний порог; 2 – нижний порог; 3 – матрица;  $h_1, h_2$  – высота магазина соответственно в нижней и верхней частях штампа;  $b$  – ширина порога;  $b_1$  – ширина магазина;  $h$  – высота порога

При обычных условиях штамповки наибольшее распространение получил третий тип облойной канавки (рис. 2.6, в). Эта канавка имеет выступающий порог

только на верхней части штампа и называется канавкой с односторонним верхним порогом. Нижняя часть штампа, на которой лежит нагретый штампуемый металл, не имеет выступа в виде порога.

Для несложных и небольших по высоте поковок, легко размещающихся в одной половине штампа, применяется облойная канавка с односторонним нижним порогом (рис. 2.6, г). При такой канавке не требуется точного совпадения частей штампов и гравировки верхней части штампа, что удешевляет стоимость его изготовления. Указанный тип канавки применяется в тех случаях, когда обрезку облоя можно производить с поворотом поковки на  $180^\circ$ .

Канавки (рис. 2.6, д) используются на части контура поковки для местного повышения сопротивления течению металла в канавку и гарантируют заполнение металлом сложной полости штампа. С этой же целью применяется канавка без магазина, но с наклонными порогами (рис. 2.6, ж). Этот тип канавки эффективен в технологическом отношении, но приводит к повышенному расходу энергии, т.к. деформирование облоя в канавке происходит в более сложных условиях.

**Расчет объема облоя.** Минимально необходимый облой определяется в зависимости от формы заготовки, положения плоскости разреза, размеров порога канавки. Колебания объемов исходных заготовок вследствие допусков на прокат и резку приводят к увеличению объема облоя на величину  $V_1$ . Например, в случае с цилиндрическими заготовками эти колебания составляют

$$V_1 = \frac{\pi}{4} (D_{\max}^2 L_{\max} - D_{\min}^2 L_{\min}), \quad (2.2)$$

где  $D_{\max}$ ,  $D_{\min}$ ,  $L_{\max}$ ,  $L_{\min}$  — соответственно предельные значения диаметра и длины заготовки.

В случае изменения  $D_0$ ,  $L_0$  (рис. 2.2) в пределах 1...2 % величина  $V_1$  достигает 6...9 %. В среднем потери металла от нестабильности геометрических размеров составляют 3...4,5 %, что больше потерь металла на окалину. С уменьшением объема заготовок относительная величина колебания их объема увеличивается. При неизменном объеме заготовок с увеличением длины и одновременно уменьшении диаметра колебания фактического объема также возрастают. Увеличение объема облоя против минимально необходимого объясняется также неравномерностью его образования. Это может быть вызвано следующими причинами:

- несоответствием профилей заготовки и поковки в плоскости разъема штампа, приводящих к неодинаковому поступлению металла в канавку в разных по периметру частях, например, при штамповке круглых в плане поковок или квадратных заготовок. Этот вид облоя отсутствует при штамповке в торец поковки типа тел вращения;

— при штамповке длинноосных поковок сложной формы заготовки в поперечном направлении формоизменяются с разной степенью деформации, и, как следствие, образуется неодинаковый облой по периметру;

- неравномерным облоем, образующимся вследствие неравномерного распределения температуры по длине заготовки.

Общий объем облоя при этом возрастает на величину  $V_2$ , которая колеблется от нескольких процентов для простых форм и до десятка процентов (от объема заготовки) для сложных форм поковок.

В процессе штамповки полость штампа изнашивается, что приводит к увеличению объема поковок (в пределах допусков). Поскольку при разделении прутков на заготовки нельзя учесть степень износа штампа к моменту штамповки каждой заготовки, объем всех заготовок увеличивают на величину  $V_3$ , компенсирующую наибольший износ штампа. В среднем величина  $V_3$  составляет 3...5 % от объема заготовки.

Увеличение облоя на величину  $V_4$  происходит в тех случаях, когда металл выдавливается в магазин преждевременно, до заполнения ручья штампа.

В общем случае фактический объем облоя равен

$$V_{\phi} = V_{\min} + V_1 + V_2 + V_3 + V_4. \quad (2.3)$$

Тщательно отработанный технологический процесс может быть практически осуществлен при  $V_2 = 0$ . Тогда

$$V_{\phi} = V_{\min} + V_1 + V_3 + V_4. \quad (2.4)$$

На практике величина облоя составляет десятки процентов от веса поковок, вместо нескольких процентов, достаточных для образования минимально необходимого облоя.

*Экономия металла на облой.* Несколько процентов от всей штампуемой стали можно сэкономить, если сократить избыток металла за счет повышения точности заготовок. Для этого необходимо применять способы безотходной и точной разделки.

Сокращения металла можно добиться уменьшением объема металла  $V_1$ , компенсирующего износ штампов. Для этого объем, характеризующий износ штампа, делится на несколько частей, соответственно которым применяют и заготовки с различной величиной избытка металла - вначале небольшой, а затем возрастающий. Экономия металла можно получить уменьшением избытка металла  $V_2$ , вызываемого неравномерностью образования облоя, за счет использования канавок с переменной шириной порога  $b$  и лучшего фасонирования заготовок.

#### *Выбор плоскости разъема*

Реальные поковки можно рассматривать как сложные геометрические фигуры, состоящие из элементарных фигур. Положение плоскости разъема определяется формой, которая должна обеспечить свободный выход заготовки из полости штампа.

ШАР. Плоскость разъема может проходить только через диаметрально сечение фигуры (рис. 2.7, а). Смещение плоскости разъема (рис. 2.7, б, сечение 2-2) приведет к напускам и потере металла. Форма поковки при этом искажается. При штамповке эллипсоида возможны два варианта плоскости разъема штампов: по большому и малому диаметральному сечениям.

КУБ. Возможны три положения плоскости разъема (рис. 2.7, в): разъем 1 требует напусков по четырем боковым граням; разъем 2 столько же, хотя потери металла в напуск меньше. Самым целесообразным является положение 3, при котором в каждой части штампа имеются естественные откосы по двум плоскостям.

ЦИЛИНДР. Возможны три варианта разъема. В зависимости от соотношения высоты  $H_0$  и диаметра  $D_0$  выбирают варианты 1, 2, 3. Вариант 1 применяют для цилиндров малой длины. В этом случае плоскость разъема совпадает с торцевой поверхностью, а штамповочные уклоны выполняются по всей длине цилиндра. Для цилиндров небольшой длины выбирается вариант 2. Плоскость разъема расположена посередине длины цилиндра, а штамповочные уклоны назначаются от верхнего и нижнего торцов. Вариант 3 целесообразно применять для цилиндров большой длины, при котором заготовка штампуются поперек оси, а напуски назначаются только по торцам.

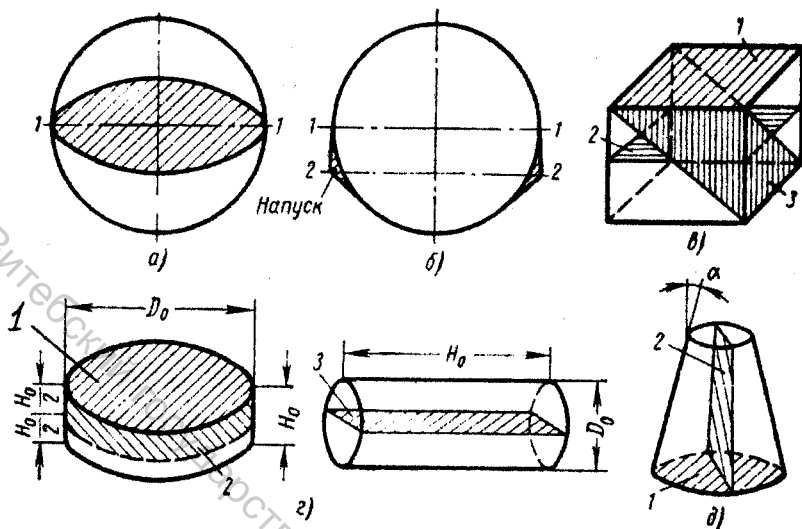


Рис. 2.7. Положение плоскостей разреза

**УСЕЧЕННЫЙ КОНУС.** Вариант 1 используют, когда величина угла конуса  $\alpha$  достаточно для извлечения поковки из ручья без приложения значительных усилий. Поковки большой длины штампуются по варианту 2 с напусками только по торцам.

Линия разреза штампов может быть прямой или ломаной. Ломаная линия разреза усложняет изготовление штампа, однако условия заполнения штампа улучшаются.

*Разделительные операции.* Схемы обрезки облоя и удаления пленок приведены на рис. 2.8.

На практике используют горячую и холодную обрезку. Горячую обрезку осуществляют при отделении облоя или пленок от поковок из легированных и высоколегированных сталей. Усилие при горячей обрезке в 5 – 6 раз меньше усилия при холодной обрезке, поэтому поковки с большой площадью среза целесообразно обрезать в горячем состоянии.



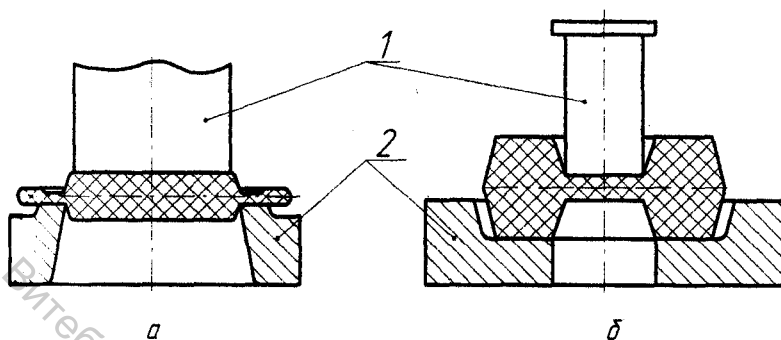


Рис. 2.8. Схемы обрезки облоя (а) и удаления пленок (б);

1 – пуансон; 2 – матрица

Поковки небольших размеров, но тонкие подвержены короблению при горячей обрезке и поэтому подлежат холодной обрезке, которая в таких случаях не требует больших усилий и обычно не сопровождается последующей правкой поковок.

## 2.7. Ручья штампов объемной штамповки

Поковки сложной формы, имеющие значительную разницу в площадях поперечного сечения, требуют предварительной обработки с целью придания формы, близкой к окончательной. Поковки таких форм получают в многоручьевом штампе.

Обработку заготовки в одном ручье называют *переходом*. Количество ручьев в штампе обычно соответствует количеству переходов.

*Операцией* называют законченную часть технологического процесса, включающего все переходы объемной штамповки, совершаемые за один нагрев независимо от количества используемого оборудования.

Все ручки горячей объемной штамповки можно разделить на три основные группы: подготовительные, окончательные и отрезные.

Подготовительные ручки штампов предназначены для формообразования заготовки простой формы в фасонную, приближающуюся к окончательной форме изделия.

Окончательные ручки предназначены для оформления поковки и подразделяются на чистовой и черновые.

Чистовой ручей (рис. 2.9, а) предназначен для получения окончательной, отчетливо оформленной поковки в соответствии с требованиями приемочного чертежа и технических условий. Изготавливают окончательный ручей по чертежу горячей поковки. Поэтому размеры полости ручья увеличивают на величину температурной усадки.

Предварительный ручей (рис. 2.9, б) предназначен для получения формы, близкой к окончательной, и обеспечивает стойкость окончательного ручья.

Заготовительно-предварительный (рис. 2.9, в) служит для получения формы, близкой к окончательной, и одновременно на некоторых участках выполняет роль заготовительного, обеспечивая значительное долевое поперечное смещение металла.

Формовочный ручей (рис. 2.9, г) служит в основном для придания заготовке формы, приближающейся к форме плана поковки. В ручье происходит лишь незначительное осевое перемещение металла.

Гибочный ручей (рис. 2.9, д) служит для изгиба заготовки в соответствии с формой поковки в плане незначительного осевого перемещения и пережима заготовки в отдельных сечениях.

Пережимной ручей (рис. 2.9, е) служит для пережима, сопровождаемого уменьшением площади поперечных сечений исходной заготовки в одних местах при незначительном наборе в других местах. Осевое перемещение также незначительно.

Открытый подкатной ручей (рис. 2.9, ж) служит для увеличения площади поперечных сечений заготовки в одних местах за счет уменьшения площади поперечных сечений исходной заготовки в других местах при незначительном удлинении заготовки. Закрытый подкатной ручей (рис. 2.9, з), благодаря закрытому профилю ручья в поперечных сечениях, обеспечивает более значительный набор металла, т.е. более интенсивное перемещение металла из участков ручья с поперечными сечениями, меньшими, чем у исходной заготовки, на участки по сечению больше, чем сечение исходной заготовки. Удлинение при этом незначительно.

Открытый протяжной ручей (рис. 2.9, и) предназначен для увеличения длины исходной заготовки за счет уменьшения площади ее поперечных сечений в тех местах, где это необходимо в соответствии с формой поковки. Закрытый протяжной ручей (рис. 2.9, к), благодаря закрытому профилю ручья в поперечных

сечениях, интенсифицирует перемещение металла в осевом направлении и способствует более значительному удлинению заготовки.

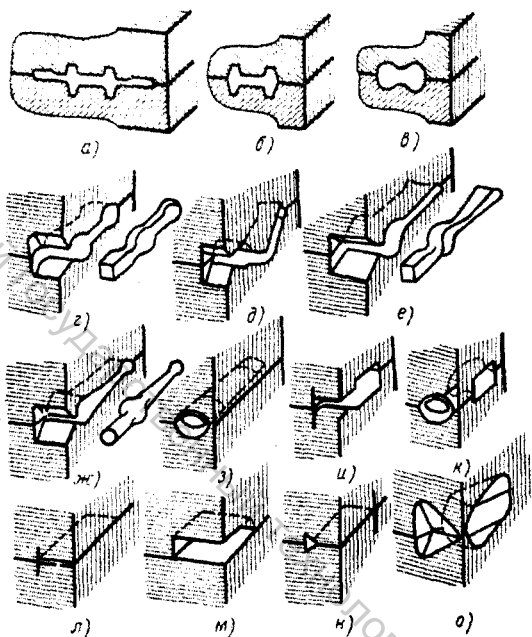


Рис. 2.9. Схемы ручьев штампов:

а - открытый окончательный ручей; б - предварительный ручей; в - заготовительно-предварительный ручей; г - формовочный ручей; д - гибочный ручей; е - пережимной ручей; ж - открытый подкатной ручей; з - закрытый подкатной ручей; и - открытый протяжной ручей; к - закрытый протяжной ручей; л - площадка для оттяжки конца; м - площадка для осадки; н - площадка для расплющивания; о - отрезной нож

Площадка для оттяжки конца (рис. 2.9, л) служит для удлинения части исходной заготовки. Площадка для осадки (рис. 2.9, м) служит для уменьшения высоты и увеличения площади поперечного сечения исходной заготовки. Площадка для расплющивания (рис. 2.9, н) служит для расплющивания исходной заготовки, иногда сопровождаемого местным пережимом металла.

Отрезной нож (рис. 2.9, о) применяют для отделения штампованной поковки от прутка, когда из исходной заготовки получают несколько поковок.

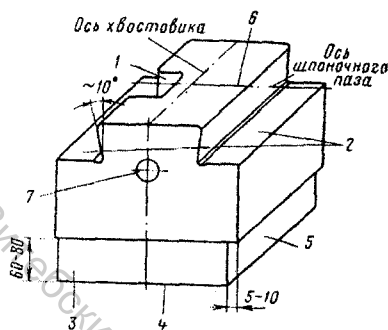


Рис. 2.10. Вспомогательные элементы штампового кубика:

1 – шпоночный паз; 2 – заплечики; 3, 5 – поперечная и продольная контрольные стороны; 4 – плоскость разреза; 6 – хвостовик; 7 – подъемные отверстия

Помимо основного назначения – формоизменения заготовки, – конструкция штампа должна обеспечить его точную установку, надежное крепление и возможность транспортирования. Элементы молотового штампа, служащие для выполнения таких вспомогательных функций, показаны на рис. 2.10. Точную установку осуществляют по контрольным граням 3 и 5, образующим между собой контрольный угол. Для транспортирования штампа служат подъемные транспортные отверстия 7. Крепление штампа к штамподержателю молота производят с помощью шпонки и клина; для этого предусматривают шпоночный паз 1 и хвостовик 6.

## 2.8. Штамповка в закрытых штампах

Сущность процесса состоит в том, что заготовка с начальными размерами  $H_0$  и  $D_0$  деформируется, находясь в полости одной части штампа, в которую входит, как в направляющую, другая его часть (рис. 2.11, а, б). Штамп не обеспечивает свободного удаления цилиндрической поковки с конечными размерами  $H_k$  и  $D_k$  из ручья. Для увеличения поковки в одном случае применяется выталкиватель 3 и штамповочные уклоны  $\alpha$  (рис. 2.11, в).

В другом случае (рис. 2.11, г) часть штампа, в которой расположена полость, выполнена разъемной, состоящей из двух половин 1' и 1''; штамп состоит из трех частей и имеет разъем в двух плоскостях; штамповочные уклоны при этом не нужны.

Покówki, формируемые в закрытых штампах, более высокого качества, чем в открытых, за счет лучшего расположения волокон, отсутствия местного интенсивного течения металла в облой и перерезанных волокон.

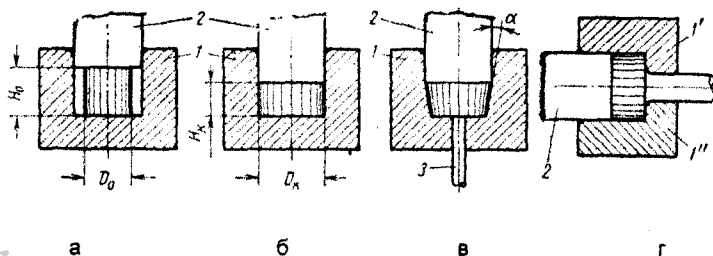


Рис. 2.11. Схемы штамповки в закрытых штампах:

1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – выталкиватель

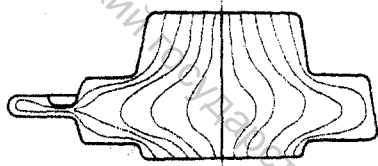


Рис. 2.12. Расположение волокон в поковках, штампуемых в открытом (левая часть) и закрытом (правая часть) штампах

На рис. 2.12 показана схема расположения волокон в поковках, штампуемых в открытом и закрытом штампах. Приведенная схема иллюстрирует большую неравномерность деформации в случае штамповки в открытых штампах; это свидетельствует о более низком качестве получаемых поковок, чем при штамповке в закрытых штампах.

Штамповка в закрытых штампах характеризуется следующими признаками:

- облой не предусматривается, поэтому объем металла в полости практически не меняется;
- образующийся заусенец вследствие затекания металла в зазор по месту разъема штампа незначителен; толщина заусенца не меняется в процессе штамповки, а направление истечения совпадает с направлением движения пуансона;
- макроструктура поковки такова, что волокна металла обтекают контур поковки и не перерезаются.

### 2.9. Штамповка выдавливанием

Сущность процесса состоит в том, что заготовка устанавливается в полость штампа, выполненного конструктивно по типу безоблойного (рис. 2.13, а), и поскольку в ручье имеется выходное отверстие, то часть металла выдавливается через него за пределы полости.

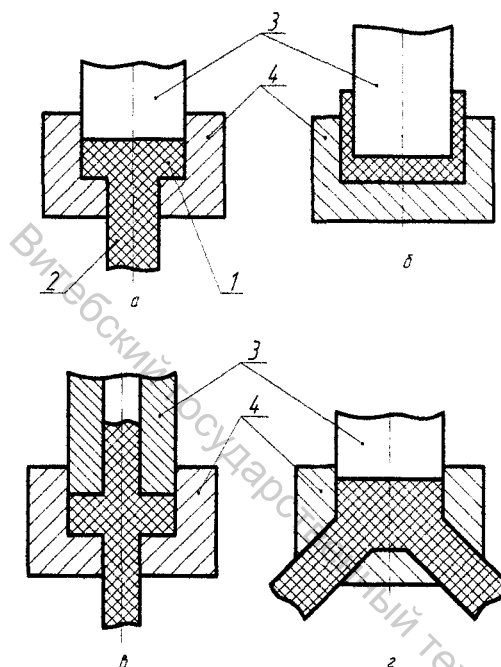


Рис. 2.13. Схемы процессов выдавливания:

а – прямое; б – обратное; в – совмещенное;  
г – боковое; 1 – основная часть поковки; 2 – стержневая часть поковки; 3 – пуансон; 4 – матрица

равномерного всестороннего сжатия, обеспечивающей металлу высокую пластичность. Благодаря этому горячая штамповка выдавливанием позволяет успешно изготавливать поковки из труднодеформируемых специальных сталей и сплавов. Некоторые труднодеформируемые сплавы могут формоизменяться только выдавливанием.

Штамповка выдавливанием – одна из наиболее прогрессивных технологий изготовления точных поковок, позволяющая значительно снизить расход металла, трудоемкость, высвободить металлорежущие станки, рабочих-станочников и повысить производительность труда. Применение прочных инструментальных сталей и эффективных смазок позволяет успешно деформировать различные стали и малопластичные сплавы.

Полученная поковка состоит из двух частей: основной 1 и стержневой 2, выдавленной через отверстие. Отходы не предусматриваются, за исключением части объема заготовки, которая является избыточной вследствие неточности прокатки или разделения пруткового материала на мерные части. Излишек металла перераспределяется в стержень, увеличивая его длину.

Главное преимущество процесса выдавливания перед штамповкой в открытых штампах состоит в возможности получения поковок точных размеров и низкой шероховатостью поверхности.

Штамповка выдавливанием протекает в очаге деформации по схеме трехосного не-

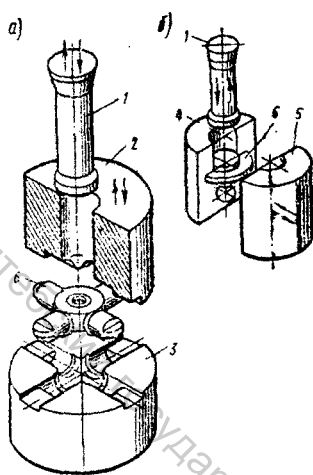


Рис. 2.14. Схемы штампов для выдавливания поковок в матрицах с горизонтальным (а) и вертикальным (б) разрезами:

1 – пуансон; 2 – верхняя полуматрица; 3 – нижняя полуматрица; 4, 5 – соответственно левая и правая полуматрицы; 6 – поковка

При штамповке поковок в матрицах с вертикальным разрезом (рис. 2.14, б) усилие раскрытия матриц резко возрастает и в зависимости от сложности поковки достигает 75 – 100% от усилия деформации.

Объем заготовки при штамповке выдавливанием  $V_{\text{заг}}$  определяют по формуле

$$V_{\text{заг}} = V_{\text{п}} + V_{\text{у}} + V_{\text{т.з}}, \quad (2.5)$$

где  $V_{\text{п}}$  – объем поковки;  $V_{\text{у}}$  – объем угара;  $V_{\text{т.з}}$  – объем торцового заусенца.

Объем поковки рассчитывают по номинальным размерам поковочного чертежа, увеличенным на половину положительных отклонений. Объем угара для черных металлов составляет 0,5 – 1,0% от объема поковки. Для определения объема торцового заусенца его толщину для поковок с головкой диаметром 40 – 100 мм принимают 1 – 1,5 мм, а высоту – 3 – 5 мм.

При выборе диаметра заготовки необходимо, чтобы отношение высоты заготовки к диаметру не превышало 2 – 2,5. Наиболее целесообразно отношение

Штамповкой выдавливанием можно получать поковки с одним или несколькими стержнями сплошные или полые, а также с боковыми отроостками (типа крестовин, тройников и т.п.). Для штамповки таких поковок необходимы штампы с двумя плоскостями разреза (рис. 2.14). Конструкция штампа с разъемными матрицами должна обеспечить плотное смыкание их перед началом выдавливания и надежное сжатие в процессе деформирования.

Усилие смыкания при штамповке в матрице с горизонтальным разрезом (рис. 2.14, а) составляет 5 – 10% от усилия штамповки, а усилие раскрытия матриц достигает 20% от усилия деформации. Если усилие смыкания недостаточно, то происходит частичное раскрытие матриц и образование заусенца по плоскости разреза.

1,5 – 1,8. При этом необходимо учитывать, что заготовка должна удобно и без перекосов укладываться в полость матрицы и не изгибаться при осадке, поэтому диаметр заготовки при прямом выдавливании целесообразно выбирать на 2–10 мм меньше диаметра полости матриц. При обратном выдавливании для предотвращения большой разностенности поковки зазор между заготовкой и полостью матрицы должен быть не более 2 мм.

Диаметр исходной заготовки определяют по формуле

$$d_{\text{заг}} = 1,08 \sqrt[3]{V_{\text{заг}} / m}, \quad (2.6)$$

где  $m = 1,5 - 1,8$ , а затем по сортаменту выбирают ближайшее значение.

Высоту исходной заготовки вычисляют по формуле

$$h_{\text{заг}} = 4V_{\text{заг}} / \pi d_{\text{заг}}^2. \quad (2.7)$$

Наиболее характерными деталями поковок, которые целесообразно штамповать выдавливанием в разъемных матрицах, являются одновенцовые зубчатые колеса автомобилей, тракторов, комбайнов, станков (I группа); крестовины и вилки карданных валов автомобилей (II группа); некоторые детали летательных аппаратов (III группа); рычаги, тяги, наконечники тяг рулевого управления автомобилей, тракторов и других машин (IV группа) (рис. 2.15).

Основные преимущества процесса штамповки поковок выдавливанием в разъемных матрицах заключаются в следующем:

- экономия металла (10-15%) за счет исключения облоя и повышения точности формы и размеров поковок. Расход металла снижается также в результате уменьшения или полного устранения напусков;
- снижение расхода металла за счет повышения точности;
- повышение производительности штамповки на 20-50% за счет сокращения числа переходов с 2-5 до 1-2;
- сокращение трудоемкости механической обработки на 10-40% за счет повышения точности формы и размеров;
- улучшение качества деталей за счет благоприятной макроструктуры металла.

## 2.10. Штамповка на молотах

Молоты относятся к машинам ударного действия. Энергия, расходуемая молотами на деформацию, представляет собой кинетическую энергию падающих частей. По этой причине, а также вследствие того, что материал штампов подвер-



жен ударному воздействию, необходимо, чтобы молотовые штампы были массивными.

| Номер группы поковок | Тип поковки | Эскизы типовых представителей |  |  |  |
|----------------------|-------------|-------------------------------|--|--|--|
| I                    | Фланцевые   |                               |  |  |  |
| II                   | Отростковые |                               |  |  |  |
| III                  | Обрезные    |                               |  |  |  |
| IV                   | Удлиненные  |                               |  |  |  |

Рис. 2.15 Классификация поковок, получаемых выдавливанием

Конец штамповки на молотах фиксируется моментом соприкосновения верхней и нижней частей штампа. При работе на молотах процесс штамповки обычно осуществляется в каждом ручье за несколько ударов.

По конструктивно-технологическим признакам молоты можно разделить на следующие группы:

*Паровоздушные молоты двойного действия.* Номинальная масса падающих частей паровоздушных молотов колеблется в пределах 0,63 – 25 т. Их применяют для открытой и закрытой штамповки поковок широкой номенклатуры по конфигурации, размерам и массе.

*Ковочные пневматические молоты.* Номинальная масса падающих частей 50 – 1000 кг, частота ударов – 95 – 225 мин<sup>-1</sup>. Предназначены пневматические молоты для изготовления поковок из проката. Применяются в мелкосерийном производстве.

*Бесшаботные молоты с двусторонним ударом.* Их применяют для штамповки тяжелых поковок (массой более 80 – 100 кг) в одноручевых штампах. Энергия удара бесшаботных молотов с ленточной связью соответствует энергии молотов с массой падающих частей 5 – 22,5 т, а бесшаботных молотов с гидравлической связью соответствует энергии падающих частей массой 10 – 50 т.

Возможность деформирования металла при встречном движении верхнего и нижнего бойков молота снижает потери энергии на сотрясение фундамента и грунта. Коэффициент использования металла колеблется в пределах 0,45 – 0,48. Особенностью конструкции рассматриваемых молотов является отсутствие устройства для выталкивания поковок.

#### *Высокоскоростные молоты*

*Винтовые пресс-молоты с фрикционным или дугостаторным приводом.* Номинальное усилие винтовых пресс-молотов изменяется в пределах 400 – 16000 кН. Наиболее часто винтовые пресс-молоты используют для одноударного режима и горячей высадки. Однако они могут работать и в многоударном режиме. Наличие нижнего выталкивателя существенно расширяет их технологические возможности, так, например, при работе на винтовых пресс-молотах можно использовать разъемные матрицы.

*Гидровинтовые пресс-молоты.* Экономичны в эксплуатации, их применение расширяет (по сравнению с фрикционными и дугостаторными молотами) технологические возможности штамповки, так как увеличивается коэффициент полезного действия и скорость деформирования (примерно в 2 раза) по сравнению со штамповкой на паровоздушных молотах. При штамповке на гидровинтовых пресс-молотах уменьшаются припуски на вертикальные размеры и толщину об-

ля, а значит, увеличивается коэффициент использования металла (на 7 – 25%) и уменьшается трудоемкость последующей механической обработки поковок.

#### *Особенности высокоскоростной штамповки.*

Основное оборудование кузнечно-штамповочных цехов – паровоздушные молоты, составлявшие около 60% всего парка кузнечных машин. Скорость падающих частей паровоздушных молотов – 6 – 8 м/сек. Чтобы увеличить энергию удара, необходимо увеличить скорость падающих частей. С этой целью были созданы высокоскоростные штамповочные молоты, основное отличие которых от обычных паровоздушных – повышенная скорость (8 – 20 м/сек у серийных молотов и 35 – 40 м/сек – у специальных).

Интенсивное выделение тепла в местах наибольшей деформации при высоких скоростях обеспечивает четкое выполнение штампуемого рельефа, получение тонких стенок (до 3 – 4 мм), ребер (до 1,5 – 2,5 мм), полотен (до 1 – 2 мм), малых радиусов закруглений (рис. 2.16).

Высокоскоростное деформирование позволяет получать поковки из жаропрочных и нержавеющей сталей, титановых сплавов с параметрами шероховатости поверхности  $Ra = 2,5 - 1,25$  мкм и  $Rz = 20 - 10$  мкм, а из алюминиевых сплавов с  $Ra = 1,25 - 0,32$  мкм.

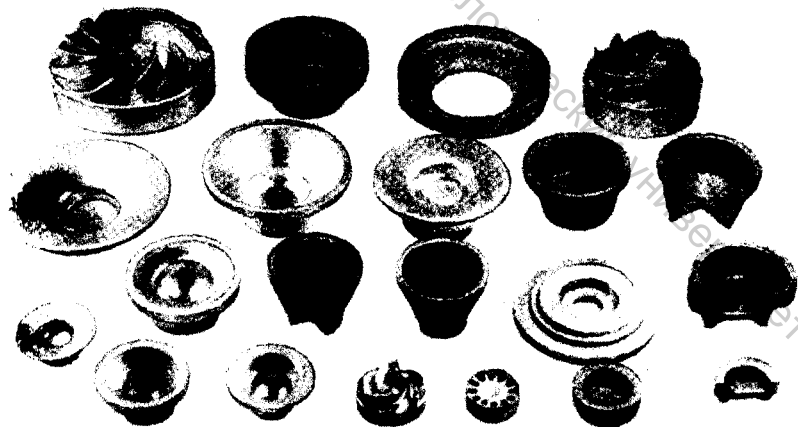


Рис. 2.16. Поковки, изготовленные на высокоскоростном молоте

Глубокое проникновение пластической деформации при высокоскоростной штамповке гарантирует хорошую проработку структуры металла, благоприятное расположение волокон и получение высококачественных поковок. Изготовленные высокоскоростной штамповкой поковки имеют мелкозернистую, равноосную, плотную структуру, что обеспечивает им более высокие механические свойства (на 10-15% выше), чем у поковок, получаемых на паровоздушных молотах.

На современном оборудовании для высокоскоростного деформирования поковки, как правило, штампуют в одном ручье и за один удар, что позволяет получать более высокую точность поковок, чем при многоручьевой штамповке. Высокоскоростные молоты дают возможность использовать наиболее прогрессивную технологию штамповки выдавливанием, в том числе в закрытых штампах.

К недостаткам высокоскоростной штамповки относится более низкая стойкость штампов по сравнению со штамповкой на обычных паровоздушных молотах.

### **2.11. Штамповка на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП)**

КГШП предназначены для горячей штамповки поковок из сортового проката в открытых и закрытых штампах. КГШП выпускают с номинальным усилием 6,3 – 80 МН и частотой ходов ползуна 90 – 35 мин<sup>-1</sup>. Их применяют для штамповки поковок различной конфигурации массой до 80 кг.

Принцип действия КГШП основан на преобразовании вращательного движения электропривода посредством кривошипно-шатунного механизма в возвратно-поступательное движение ползуна. Основной особенностью конструкции КГШП является наличие жесткой связи между приводом и ползуном. Ползун имеет постоянную величину хода, определенное нижнее положение, а скорость его перемещения не зависит от сопротивления деформированию штампуемой заготовки.

КГШП являются довольно сложными машинами, состоящими из более десятка узлов и нескольких сот деталей. Особенности КГШП являются: жесткая конструкция главных узлов и всего пресса в целом для обеспечения высокой точности поковок; усиленные направляющие ползуна, обеспечивающие восприятие эксцентричных нагрузок при многоручьевой штамповке; увеличенная частота ходов ползуна для уменьшения продолжительности контакта штампов с горячей заготовкой в процессе штамповки; наличие выталкивателей для удаления поковок из штампов; неударный, более спокойный, чем на молотах, характер работы.

Широкое распространение КГШП объясняется их технологическими и эксплуатационными преимуществами по сравнению с молотами. Относительно высокая точность получаемых поковок, особенно по высоте. По сдвигу в поперечном направлении поковки даже не контролируют, так как конструкция прессы обеспечивает высокую их точность вследствие надежного направления ползуна в направляющих станины и наличия направляющих колонок и втулок в штампе для точного совпадения верхней и нижней частей штампа.

Уменьшенные припуски на механическую обработку, а также уменьшенные штамповочные уклоны из-за наличия выталкивателей для удаления поковок из штампов.

Более высокая производительность - в среднем в 1,4 раза. Это объясняется тем, что деформация на прессе в каждом ручье происходит за один ход, а на молоте за несколько ударов. Экономный расход энергии, коэффициент полезного действия прессов в 4 раза больше, чем молотов.

Относительно спокойный безударный характер работы, позволяющий устанавливать КГШП в зданиях облегченной конструкции. Пониженные шумовые эффекты, вибрации и сотрясения почвы в цехе.

Кривошипные прессы позволяют применять прогрессивные металло- и энергосберегающие технологии: штамповку в закрытых штампах с разъемными матрицами поковок с отрезками, буртами, выступами, поднутрениями и др.; штамповку шестерен с формообразованием зубьев; использование заготовок, предварительно спрофилированных.

Эффективность штамповки поковок из труднодеформируемых сталей и сплавов горячим выдавливанием по сравнению с облойной штамповкой характеризуется снижением расхода металла на 15 – 50% и трудоемкости на 10 – 40%.

Реализация на кривошипных прессах полугорячего выдавливания вместо обработки резанием позволяет экономить до 50% металла, снизить на 50% трудоемкость и на 30% себестоимость. Коэффициент использования металла может повышаться до 0,8 – 0,95.

Штамповка на КГШП конических шестерен с формообразованием зубьев дает возможность сократить расход металла в стружку до 45%, повысить прочность зубьев в среднем на 25 – 30% в сравнении с традиционной технологией изготовления поковок без формообразования зубьев, высвободить металлорежу-

щее оборудование в результате ликвидации черного зубоношения и повысить качество конических шестерен.

Штапуемые на КГШП поковки в зависимости от конфигурации подразделяются на пять основных групп (рис. 2.17).

| Группа | Подгруппа |   |   |
|--------|-----------|---|---|
|        | А         | Б | В |
| I      |           |   |   |
| II     |           |   |   |
| III    |           |   |   |
| IV     |           |   |   |
| V      |           |   |   |

Рис. 2.17. Классификация поковок, штапуемых на КГШП

**Группа I.** Осесимметричные поковки, изготавливаемые осадкой в торец или осадкой с одновременным выдавливанием.

**Группа II.** Поковки удлиненной формы с небольшой разницей в площадях поперечных сечений.

В первой и второй группах поковки подгрупп А, Б и В штапуют соответственно за один, два и три перехода.

**Группа III.** Поковки удлиненной формы со значительной разницей в площадях поперечных сечений. Для изготовления таких поковок требуются заготовки, предварительно обработанные высадкой на ГКМ или выдавливанием (подгруп-

ла А), вальцовкой на ковочных вальцах (подгруппа Б), комбинированными процессами (подгруппа В).

**Группа IV.** Поковки с изогнутой осью. Подгруппы А, Б и В – поковки, требующие соответственно применения штампа с замком, гибочного ручья или того и другого.

**Группа V.** Поковки, изготавливаемые выдавливанием. У поковок типа стержня с утолщением (А) стержневые элементы образуются выдавливанием металла в направлении оси поковки.

У поковок с утолщениями или отростками (Б) происходит выдавливание металла в направлениях, перпендикулярных к оси поковки. У поковок с глухой или сквозной полостью (В) полые элементы образуются выдавливанием металла в замкнутую кольцевую полость.

## **2.12. Штамповка на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ)**

ГКМ представляют собой кривошипные прессы с перемещением главного и зажимного ползунов в горизонтальной плоскости. Конструкция предусматривает наличие двух взаимно-перпендикулярных разъемов (рис. 2.18).

Один разъем проходит между пуансоном 1, закрепленным в блоке пуансонов 2, и матрицами 3, 4. Второй разъем находится между неподвижной матрицей 3 и подвижной 4. В начале процесса пуансон и обе матрицы находятся в разомкнутом состоянии (положение I).

Пруток металла диаметром  $D_0$  помещается в неподвижную матрицу до соприкосновения с упором 5, положение которого отрегулировано так, что в полости матрицы оказывается участок прутка длиной  $l_6$ , предназначенный для деформирования (высадки). Затем включают машину на рабочий ход. Подвижные части приходят в движение в следующей последовательности. Прежде всего в рабочее положение становится подвижная матрица (положение II). Это обеспечивает плотный зажим прутка, после чего упор 5 автоматически отходит, а пуансон приходит в соприкосновение с прутком металла. При дальнейшем движении пуансона производится деформация части прутка длиной  $l_6$ , при этом заготовка принимает форму полости ручья (положение III).

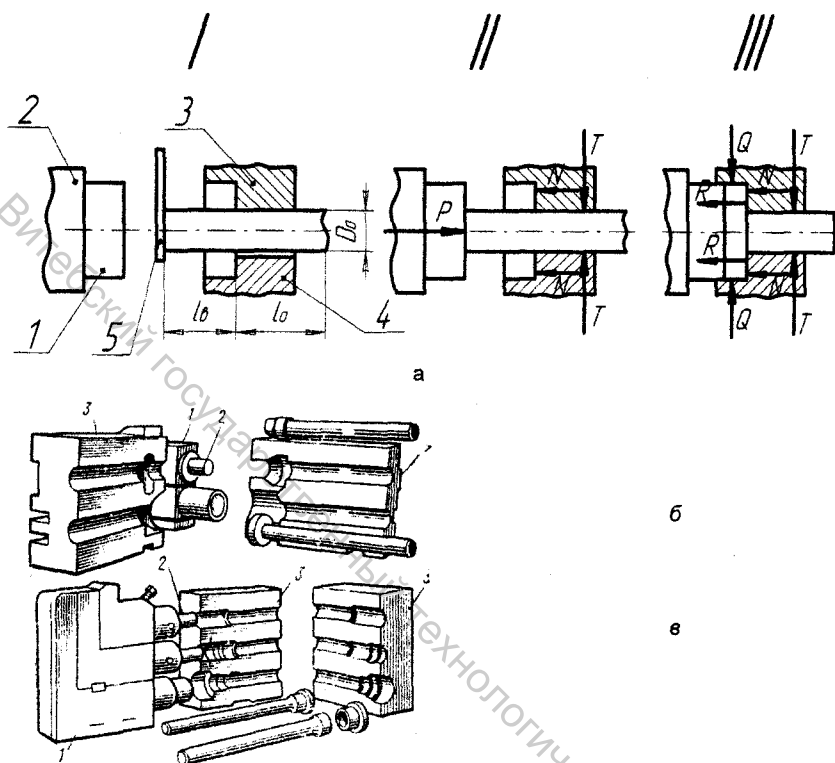


Рис. 2.18. Штамповка на ГKM: а - схема процесса штамповки; б – двухручьева; в – трехручьева

1 – пуансон; 2 – блок пуансонов; 3 – матрица неподвижная; 4 – матрица подвижная; 5 – упор

При обратном ходе машины из полости сомкнутых матриц удаляется пуансон, подвижная матрица отходит, подвижный упор становится в исходное положение, а оператор удаляет пруток с деформированным концом. Такой порядок передвижения частей инструмента обеспечивается кинематической системой ГKM.

В заготовке в момент зажатия прутка (положение II) возникают боковые силы  $T$ , которые вызывают силы трения  $N$ , удерживающие пруток при последующей деформации его конца силой  $P$  пуансона ( $P \leq N$ ). В положении III сила  $P$  имеет



максимальное значение, но это не требует увеличения сил трения для удержания прутка в зажатом состоянии, так как образовавшееся утолщение на конце прутка упирается в заднюю стенку ручья и возникают дополнительные силы  $R$  и  $Q$ .

Применяют ГKM с вертикальным и горизонтальным разрезами матриц. На постсоветском пространстве наиболее распространены ГKM с вертикальным разрезом матриц (рис. 2.18, б, в). За рубежом наиболее распространены машины с горизонтальным разрезом матриц. Горячая штамповка на ГKM является весьма распространенным и одним из наиболее производительных и экономичных способов штамповки во всех отраслях машиностроения.

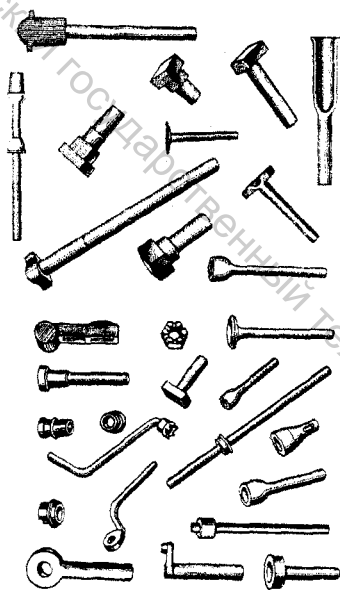


Рис. 2.19. Типовые поковки, штампуемые на ГKM

Наличие двух взаимно-перпендикулярных плоскостей разреза штампов позволяет применять самую прогрессивную технологию – закрытую штамповку – и получать такие поковки, которые невозможно получать при штамповке на другом штамповочном оборудовании в штампах с одной плоскостью разреза, например, поковки со сквозным отверстием, с глубокой глухой полостью, со стержнем, прошитым утолщением и др. (рис. 2.19).

Основные операции при штамповке на ГKM – высадка, прошивка и просечка, а также пережим, отрезка, гибка, рас-

плющивание, выдавливание и обрезка облоя. Длину высаживаемой части заготовки при штамповке поковок типа стержня с утолщением на конце определяют по номинальным размерам поковки  $V_n$  (окончательного формовочного перехода) с учетом половины положительных отклонений размеров поковки, потерь металла на угар  $V_y$  и отхода металла на облой  $V_o$ , если он неизбежен.

Таким образом, объем высаживаемой части заготовки  $V_{зар}$

$$V_{\text{заг}} = V_{\text{п}} + V_{\text{у}} + V_{\text{о}}, \quad (2.8)$$

где  $V_{\text{п}}$  – номинальный объем поковки;  $V_{\text{у}}$  – объем потерь металла на угар;  $V_{\text{о}}$  – отход металла на облой.

Длина высаживаемой части заготовки

$$l_{\text{в}} = 4V_{\text{заг}} / \pi D_0^2, \quad (2.9)$$

где  $D_0$  – диаметр прутка.

Длина всей заготовки для штамповки поковки

$$l_{\text{заг}} = l_{\text{в}} + l_{\text{о}}, \quad (2.10)$$

где  $l_{\text{о}}$  – длина стержня.

Объем окончательного формовочного перехода  $V_{\text{ф}}$  при штамповке колец и втулок вычисляют по номинальным размерам поковки  $V_{\text{п}}$  с учетом усадки перемычки  $V_{\text{пер}}$ , облоя  $V_{\text{о}}$  (если он предусмотрен), угара  $V_{\text{у}}$ , половины положительных отклонений наружных размеров поковки и половины отрицательных отклонений внутренних размеров (полостей), приводящих к его увеличению

$$V_{\text{ф}} = V_{\text{п}} + V_{\text{пер}} + V_{\text{о}} + V_{\text{у}}. \quad (2.11)$$

Диаметр исходной заготовки определяют по формуле

$$d = (0,8 + 0,95) \sqrt[3]{V_{\text{ф}}}. \quad (2.12)$$

Длина высаживаемой части заготовки

$$l_{\text{в}} = 4V_{\text{ф}} / \pi d^2. \quad (2.13)$$

Вследствие потери устойчивости заготовки при однопереходной штамповке необходимо соблюдение условия  $l_{\text{в}} \leq 2,5d$ . В противном случае осадку необходимо производить за два перехода.

### 2.13. Штамповка на гидравлических прессах

Гидравлические прессы применяют в основном для штамповки крупнобаритных заготовок из легких сплавов. Величина усилия деформирования гидравлических прессов составляет 20000 – 150000 кН, ход плунжера 1000 – 2000 мм. Созданы особо мощные штамповочные гидравлические прессы усилием 300000 – 750000 кН. Их применяют в самолетостроении (лонжероны, панели, рамы, кронштейны), в химической промышленности (днища, элементы обшивки емкостей),

судостроении (лопасти гребных винтов, каркасные детали), энергомашиностроении (отводы трубопроводов, крышки реакторов), тепловозостроении (коленчатые валы, колеса, диски), в вагоностроении (люки, рамы, двери), в автомобильной и тракторной промышленности.

Крупногабаритные детали, изготовленные из цельноштампованных поковок, имеют более высокие прочность и долговечность, чем такие же детали, полученные механической обработкой проката.

На гидравлических прессах штампуют поковки различной конфигурации в открытых и закрытых штампах массой от нескольких сот килограммов до 8000 кг.

Наиболее распространена штамповка в открытых штампах поковок из алюминиевых и титановых сплавов с продольным и продольно-поперечным оребрением. Штамповка таких деталей осуществляется последовательно отдельными участками с перемещением стола пресса или штампа (рис. 2.20). Штамповка крупногабаритных поковок производится секционно (рис. 2.21).

Для выполнения формоизменяющих операций горячей объемной штамповки на гидравлических прессах применяют три типа штампов:

- крупногабаритные открытые для штамповки ребристых поковок из легких сплавов;
- крупногабаритные закрытые для штамповки круглых в плане поковок;
- закрытые и открытые для штамповки сложных поковок с применением накладных колец и плит.

Вследствие больших габаритных размеров ребристых поковок из легких сплавов штампы обычно изготавливают одноручевыми. Многопереходную штамповку производят последовательно в разных штампах: предварительных и окончательном.

При штамповке поковок с односторонними ребрами гравюру располагают в нижнем штампе, при этом рабочую поверхность верхнего штампа углубляют и выполняют гладкой. В штампах с двухсторонними ребрами фрезеруют обе половины гравюры. При этом линия разреза делит деталь по толщине пополам. Для того чтобы облегчить удаление готовойковки, выполняют штамповочные уклоны  $3 - 7^\circ$ ; для лучшего заполнения полости штампа места переходов закругляют. Внутренние радиусы закругления составляют 1,5 – 6 мм, наружные – 3 – 15 мм. Ручей окончательных чистовых штампов изготавливают с облойными канавками.

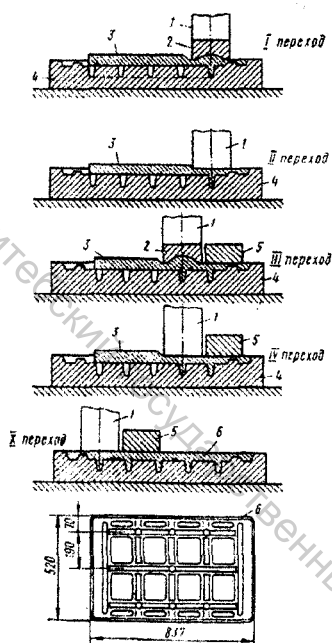


Рис. 2.20. Схема последовательной штамповки поковки панели за 10 переходов на гидравлическом прессе усиленном 26000 кН

1 – верхний штамп; 2 – накладная плита; 3 – заготовка; 4 – нижний штамп; 5 – прижимная плита; 6 – готовая поковка

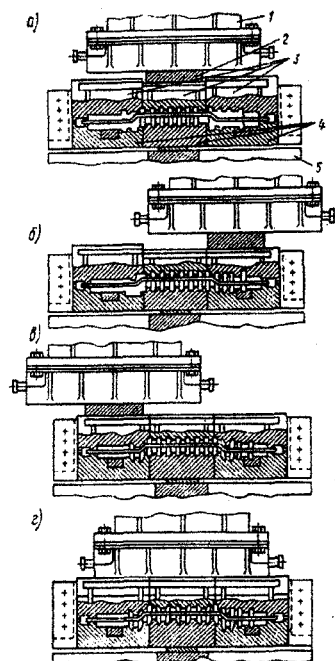


Рис. 2.21. Схема секционной штамповки коленчатого вала на гидравлическом прессе

а, б, в – соответственно штамповка средней, правой и левой частей; г – калибровка готовой поковки всеми секциями штампа; 1 – траверса; 2 – накладка; 3, 4 – секции соответственно верхнего и нижнего штампов; 5 – стол пресса

В зависимости от размеров штампуемой поковки масса каждой из половинок штампа составляет 10 – 25 т. Чтобы устранить сдвиги верхней и нижней половинок штампа относительно друг друга и повысить точность поковок, штампы выполняют с направляющими колонками, а также применяют замки. Постоянную температуру крупногабаритных штампов поддерживают посредством индукционных нагревателей.

Поковки даже простой конфигурации на гидравлических прессах следует штамповать не менее чем за два перехода и два нагрева. При этом можно применять многократную штамповку в окончательном ручье.

*Штамповка на гидравлических многоплунжерных прессах* является наиболее прогрессивной технологией, обеспечивающей повышенное качество поковки с минимальным расходом металла. Конструкция таких прессов предусматривает, кроме центральных, наличие боковых пуансонов. На оборудовании такого типа можно изготавливать детали с несколькими внутренними полостями. Формообразование поковки осуществляется в закрытых штампах с разъемными матрицами в условиях всестороннего сжатия деформируемого металла.

При многополостной безоблойной штамповке существенно повышаются качественные показатели поковки: однородная хорошо проработанная мелкозернистая структура; благоприятная ориентация волокон; более равномерное, чем при обычной штамповке, распределение механических свойств.

Важное преимущество этой технологии – высокий ресурс деталей в эксплуатации, большая экономическая эффективность. Многополостная безоблойная штамповка позволяет избавиться от потерь металла на образование облоя, приблизить форму и размеры поковки к форме и размерам чистовых деталей, снизить себестоимость изготовленных деталей. Коэффициент использования металла при изготовлении деталей сложной конфигурации повышается в 2 – 4 раза.

В зависимости от сложности конфигурации поковки формируют в штампах с вертикальным разъемом матриц (рис. 2.22, а), с горизонтальным разъемом матриц (рис. 2.22, б) и с разъемом матриц в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях (рис. 2.22, в).

В первом случае после зажима полуматриц горизонтальными плунжерами и укладки заготовки в полость штампа производится деформирование главным пуансоном верхнего плунжера. После раскрытия полуматриц боковые плунжеры удаляют поковку из ручья штампа.

Во втором случае полуматрицы закрепляются на столе пресса и в вертикальном плунжере, а главные деформирующие пуансоны – на боковых горизонтальных плунжерах. После укладки заготовки в полость штампа и зажима полуматриц производится формообразование поковки главными боковыми пуансонами. После раскрытия полуматриц вертикальные плунжеры выталкивают поковку из ручья штампа.

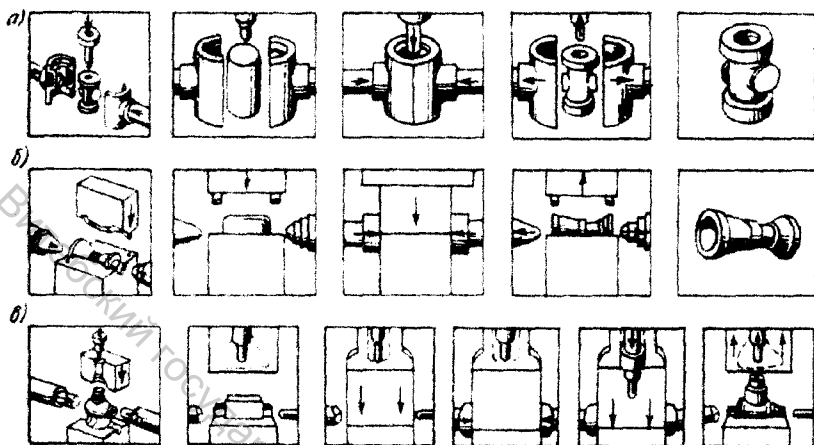


Рис. 2.22. Схемы штамповки сложных поковок в разъемных штампах на многоплунжерных прессах:

а – вертикальный разъем матриц; б – горизонтальный разъем матриц; в – разъем в двух взаимно перпендикулярных плоскостях

В третьем случае заготовка укладывается в нижнюю полуматрицу и зажимается верхней полуматрицей, а затем деформируется горизонтальными пуансонами. Окончательное формообразование поковки осуществляется верхним прошивным пуансоном.

На рис. 2.23 приведена классификация поковок, изготавливаемых на многоплунжерных прессах.

**I группа** – поковки типа цилиндра или призмы постоянного или переменного сечения с утолщением, выступом или прямыми. В подгруппу I-1 входят поковки с одним утолщением или выступом, которые могут быть получены прямым или обратным выдавливанием в неразъемной матрице. Подгруппа I-2 включает поковки с несколькими утолщениями или выступами, штамповать которые можно только в штампах с разъемными матрицами.

**II группа** – поковки типа крышек, осей с фланцами, ниппелей и других соединительных деталей трубопроводов, штампуемых в цельных и разъемных матрицах. К подгруппе II-1 относятся поковки с одним фланцем, к подгруппе II-2 – поковки с несколькими фланцами.

| Группа поковки            | Подгруппа поковки                                             | Сплошные | Полые            |  |                         |  |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------|----------|------------------|--|-------------------------|--|
|                           |                                                               |          | С одной полостью |  | С несколькими полостями |  |
| I тип цилиндра или призмы | 1. С одним утолщением, выступом или прямым                    |          |                  |  |                         |  |
|                           | 2. С несколькими утолщениями и выступами                      |          |                  |  |                         |  |
| II фланцевые              | 1. С одним фланцем                                            |          |                  |  |                         |  |
|                           | 2. С двумя фланцами                                           |          |                  |  |                         |  |
| III отрезковые            | 1. С осевыми и боковыми отрезками                             |          |                  |  |                         |  |
|                           | 2. С несколькими боковыми отрезками                           |          |                  |  |                         |  |
|                           | 3. С осевым отрезком и утолщениями на отрезках                |          |                  |  |                         |  |
|                           | 4. С несколькими боковыми отрезками и утолщениями на отрезках |          |                  |  |                         |  |
|                           | 5. С двумя боковыми отрезками, осей которых не пересекаются   |          |                  |  |                         |  |
| IV с отрезками и фланцем  |                                                               |          |                  |  |                         |  |

Рис. 2.23. Классификация поковок, штампуемых на многоплунжерных прессах

**III группа** – отrostковые поковки, которые штампуют в разъемных матрицах одним или несколькими пуансонами с обязательным применением бокового выдавливания; подгруппа III-1 – поковки с осевым и боковым отrostками; подгруппа III-2 – поковки с осевым и несколькими боковыми отrostками; подгруппы III-3, III-4, III-5 – поковки с осевым и боковым отrostками и утолщениями на них, причем оси боковых отrostков не пересекаются, но отrostки расположены в одной плоскости.

**IV группа** – поковки с отrostками и фланцем, сплошные или с полостями.

Многоплунжерная штамповка поковок сложной конфигурации характеризуется высокими показателями весовой точности и производительности, что показывает экономическую целесообразность и перспективы ее применения. Широкое внедрение технологии штамповки точных высококачественных поковок на многоплунжерных гидравлических прессах позволит расширить технологические возможности штамповочного производства и обеспечить в машиностроении значительную экономию материальных ресурсов.

## 2.14. Формообразование поковок методами прокатки

**Вальцовка.** Сущность процесса поясняется схемами (рис. 2.24, 2.25)

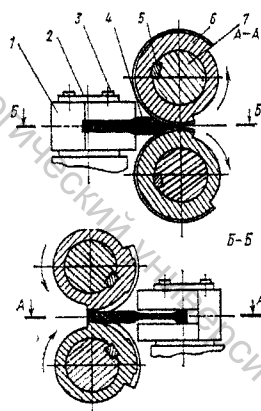
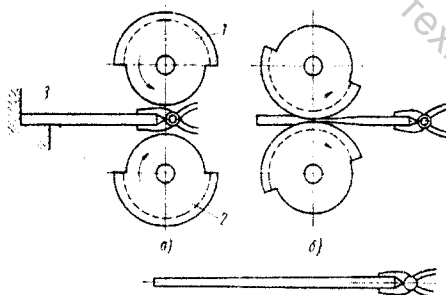


Рис. 2.24. Схема вальцовки в одноклетевых ковочных вальцах:  
а – исходное положение вальцев; б – деформация заготовки.

1, 2 – вальцы; 3 – упор

Рис. 2.25. Схема вальцовки в двухклетевых ковочных вальцах.

1 – валок вертикальной клетки; 2 – крышка; 3 – болт; 4 – заготовка; 5 – шпонка; 6 – валок горизонтальной клетки; 7 – вал горизонтальной клетки



Схема профилирования вальцовкой в одноклетьевых ковочных вальцах представлена на рис. 2.24. На валках 1 и 2, расположенных горизонтально, закрепляются вставки с ручьями. Вставки охватывают часть длины окружности поверхности каждого валка. В исходном положении вставки с ручьями находятся на максимальном друг от друга расстоянии; при этом между валками имеется проход для заготовки, которая подается до упора 3. После включения вальцев на рабочий ход валки начинают вращаться, захватывают заготовку, обжимают ее в ручье и направляют ее в сторону, противоположную подаче.

Консольные одноклетьевые вальцы используют для одно- и многопереходного профилирования; консольные двухклетьевые – для непрерывного профилирования заготовок (рис. 2.25).

Вальцовка применяется как предварительная операция для профилирования заготовок под последующую штамповку (на молоте или прессе), а также как окончательная операция для штамповки мелких и средних поковок переменного сечения.

*Штамповка в вальцах.* Сущность процесса состоит в том, что применяется обычный метод штамповки в открытых штампах, только ручьи выполнены в валках (рис. 2.26).

В процессе вращения валков в результате деформации заготовки по высоте происходит последовательное заполнение ручьев верхнего и нижнего штампов. Излишки металла выдавливаются, образуя облой.

Штамповка в вальцах производится валками диаметром 500 – 1000 мм с окружной скоростью 0,4 – 0,85 м/сек и применяется в основном при массовом и крупносерийном производстве для получения мелких и средних поковок переменного сечения простой и сложной формы, например, боковых звеньев скребкового транспортера, слесарного инструмента и др.

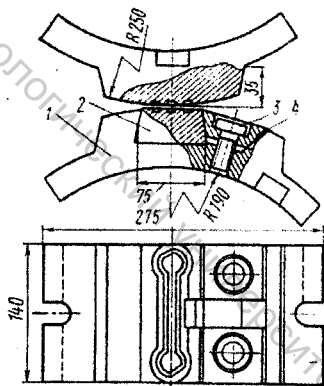


Рис. 2.26. Штамп для поперечной вальцовки (верхняя половина – цельная, нижняя – сборная):

1 – штамп; 2 – рабочая вставка; 3 – болт; 4 –

прижим

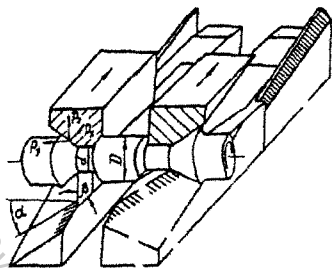


Рис. 2.27. Схема поперечно-клиновой прокатки

### Поперечно-клиновая прокатка

Сущность процесса поперечно-клиновой прокатки заключается в следующем: штучная заготовка, как правило, отделенная от прутка, укладывается поперек заходной части неподвижного инструмента (рис. 2.27). Подвижный инструмент с аналогичным профилем, перемещаясь параллельно неподвижному, внедряется в заготовку, вызывая ее вращение.

Оба инструмента имеют наклонные боковые грани, которые заставляют перемещаться избытки металла по направлению к торцам, тем самым удлиняя заготовку. Положение наклонной боковой грани в пространстве определяется углами наклона  $\alpha$  и заострения  $\beta$ . Непрерывно перекатываясь вдоль неподвижного инструмента, заготовка приближается к форме готового изделия. На заключительной стадии ножами, установленными по обе стороны инструмента, обрезают избытки металла от окончательно оформленного изделия. Затем она удаляется, а подвижный инструмент возвращается в исходное положение. Цикл обработки, составляющий 3 – 10 с, повторяется с последующей заготовкой.

Деформационные усилия представляются тремя составляющими: усилием прокатки  $P_x$ , осевым –  $P_y$  и сжимающим –  $P_z$ . Усилие прокатки  $P_x$  определяет мощность привода станов поперечно-клиновой прокатки. Осевое усилие  $P_y$  характеризует величину растягивающих напряжений, возникающих в прокатываемой заготовке, которые не должны превышать предела текучести прокатываемого материала во избежание растяжения или разрыва стержня. Сжимающее усилие  $P_z$  оказывает распорное воздействие на прокатную клеть. Чтобы оно не повлияло на точность изделия, необходимо обеспечить достаточную жесткость клетки, при этом величина упругих деформаций клетки должна быть значительно меньше величины допусков прокатываемых изделий.

Интенсивность формоизменения при прокатке характеризуется степенью обжатия  $\delta = D/d$ , где  $D$  – диаметр исходной заготовки,  $d$  – диаметр заготовки после прокатки в рассматриваемом сечении.

Основными технологическими параметрами клинового инструмента при прокатке цилиндрических участков являются углы наклона боковой грани  $\alpha$  и заострения  $\beta$ . С увеличением угла  $\alpha$  уменьшается длина очага деформации и потребное усилие прокатки  $P_x$ . Однако при этом возрастает осевое усилие  $P_y$ , которое при определенном значении обжатия может вызвать разрыв заготовки.

Угол  $\beta$  определяет скорость распространения очага деформации вдоль оси заготовки; длину инструмента; максимально достигаемую степень обжатия за проход и существенно влияет на силовой режим процесса прокатки. Правильность выбора углов  $\alpha$  и  $\beta$ , степени обжатия  $\delta$  регламентирует проведение процесса в устойчивом режиме, исключающем проскальзывание заготовки. Эти параметры существенно влияют на силовые, кинематические параметры, КПД процесса, напряженно-деформированное состояние.

Существует несколько схем поперечно-клиновой прокатки и соответствующих им конструкций станов (рис. 2.28). Каждая из указанных схем имеет как определенные преимущества, так и недостатки, в связи с чем наметилась некоторая специализация в их использовании. Так, одновалковая схема прокатки (рис. 1.28, а) не обеспечивает значительных обжатий, так как крутящий момент приложен к заготовке только на одном ее участке. Кроме того, распорные усилия приводят к изгибу заготовки. Все это ограничивает технологические возможности данной схемы прокатки. Двухвалковая прокатка (рис. 2.28, б, в) используется при массовом производстве и характеризуется чрезвычайно высокой производительностью, но вместе с этим и очень высокой стоимостью инструмента и сложностью отладки процессов. В двухвалковых станах заготовка удерживается в рабочей зоне направляющими проводками либо центрами. За счет трения заготовки по направляющим отдельные ее выступы могут искажать свою форму и снижать точность изделия. Использование центров приводит к перерасходу металла, так как участки на заготовке, контактирующие с центрами, как правило, подлежат последующей отрезке.

Достоинством валковых станов является возможность прокатки изделий из прутка, что наиболее эффективно при прокатке коротких заготовок. Дело в том, что при прокатке из прутка штучные заготовки получаются излишне короткими и их транспортировку трудно автоматизировать. Кроме того, доля концевых отходов в объеме заготовки становится настолько значительной, что рентабельность прокатки резко снижается. Валковые станы также успешно используются при прокат-

ка несимметричных деталей, поскольку при этом отпадает необходимость в выравнивании условий прокатки в различных частях заготовки.

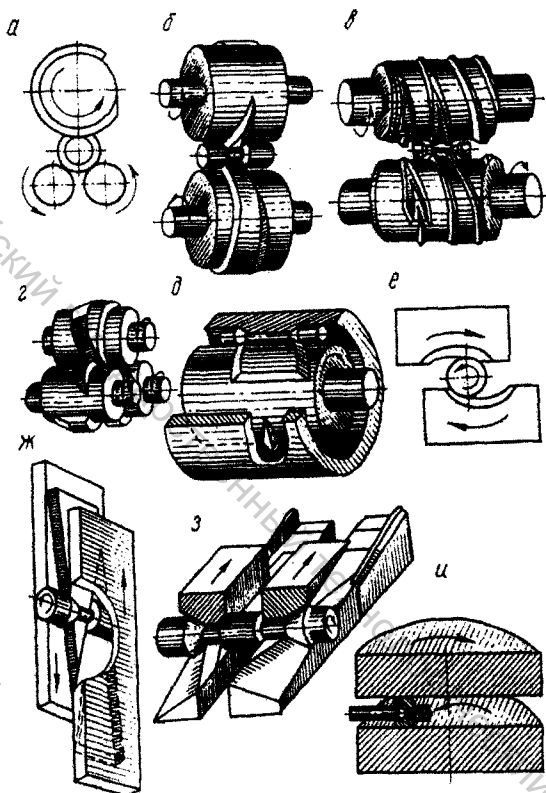


Рис. 2.28. Схемы станов поперечно-клиновой прокатки:

а – одновальная; б – двухвальная; в – двухвальная с винтовыми калибрами; г – трехвальная; д – валково-сегментная; е – двухсегментная; ж – прокатка двумя подвижными плитами; з – прокатка подвижной и неподвижной плитами; и – прокатка двумя дисками

Трехвальные станы (рис. 2.28, г) создают качественно отличное напряженное состояние в очаге деформации и значительно снижают вероятность разрушения металла в осевой зоне заготовки, которым может сопровождаться поперечная прокатка. При прокатке тремя валками к заготовке может передаваться в 1,5 раза больший крутящий момент (три контактные площадки вместо двух), что позволяет

в значительной мере интенсифицировать процесс прокатки. Недостаток данной схемы заключается в незначительных диаметрах валков и в ограниченных обжатиях, так как при сближении валки упираются один в другой, чем в значительной степени ограничиваются технологические возможности станов.

Валково-сегментные станы (рис. 2.28, д) отличаются предельной простотой и обеспечивают максимальную производительность процесса в связи с тем, что загрузка и удаление заготовок производятся без остановки вращения валка. Недостаток станов заключается в сложности изготовления и отладки сегментов инструмента и отсутствии регулировки расстояния между валком и сегментом, что отрицательно сказывается на точности изделия. Станы работают со штучной заготовкой.

Двухсегментные станы (рис. 2.28, е) характеризуются незначительной производительностью и в основном используются для накатки шлицев и зубьев шестерен, однако могут применяться и для поперечно-клиновой прокатки валов. К недостаткам станов относится также и ограниченная длина инструмента.

Станы с двумя подвижными плитами (рис. 2.28, ж) отличаются простотой изготовления и ремонта сложного и высокоточного инструмента, чем обеспечивает высокая точность изделий и простота отладки новых технологических процессов. Недостаток заключается в невысокой производительности процесса в связи с двумя остановками плит (для загрузки и удаления заготовок) и холостым обратным ходом.

Станы с подвижной и неподвижной плитами (рис. 2.28, з) обладают вышеуказанными преимуществами и вместе с тем не требуют остановок для загрузки и удаления заготовки. Разработаны схемы, позволяющие использовать для прокатки и обратный ход подвижной плиты. Кроме того, за счет перемещения неподвижной плиты и положения инструмента на ней имеется возможность автоматически регулировать диаметральные и линейные размеры и тем самым повысить точность прокатанных деталей.

Недостаток данных станов заключается в невозможности прокатки от прутка и, следовательно, в нерентабельности изготовления коротких заготовок, длина которых не превышает 1 – 1,5 его диаметра.

Эксплуатация перечисленных станов в промышленных условиях определила целесообразные области использования каждой конструкции. Так, валково-сегментные станы наиболее эффективны в массовом производстве при вальцовке

заготовок под последующую штамповку; станы с плоскими плитами – при изготовлении с частыми переналадками большой номенклатуры высокоточных деталей сложной конфигурации; валковые станы занимают промежуточное положение: они наиболее эффективны при прокатке одного - двух изделий, особенно коротких, с относительно невысокими требованиями к их точности.

Не применяется в промышленности также схема прокатки двумя дисками (рис. 1.28, и), что вызвано сложностью изготовления клинового инструмента.

Из всех рассмотренных принципиальных схем поперечно-клиновой прокатки наибольшее применение получили двухвалковая и плоскоклиновая, на основе которых созданы соответствующие виды оборудования, позволяющие прокатывать заготовки диаметром 0,5 - 130 мм и длиной 5 – 630 мм.

Конфигурация получаемых изделий весьма многообразна (рис. 2.29). Она включает цилиндрические, конические, сферические и другие формы, всевозможные канавки и выступы. Перепады диаметров могут быть значительными, допускается четырехкратное их уменьшение. Если в качестве исходной заготовки используется прутки с квадратным или шестигранным сечением, то эти элементы могут быть сохранены без изменений обрабатываемой детали.

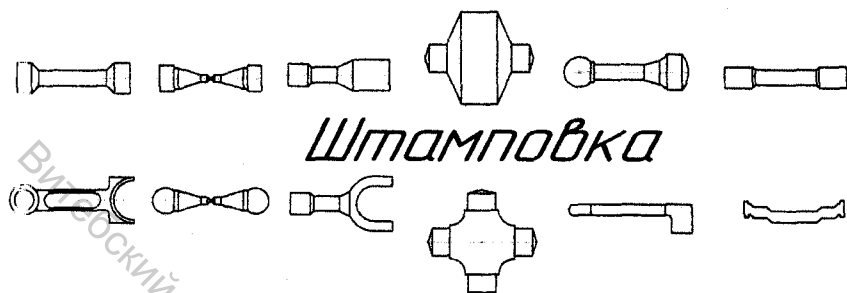
Поперечно-клиновая прокатка может использоваться в технологическом процессе для производства промежуточных профилированных заготовок под последующую точную штамповку или иные процессы пластического деформирования, а также под чистовую механическую обработку.

Поперечно-клиновой прокатке могут подвергаться практически все конструкционные стали, ряд инструментальных сталей и жаропрочных материалов, а также цветные сплавы на основе меди и алюминия. Точность прокатанных изделий соизмерима с точностью деталей, полученных на токарных автоматах. Детали сельхозмашиностроения получают без дальнейшей механической обработки. В других случаях используют окончательную шлифовку. Повышается износостойкость и усталостная прочность деталей.

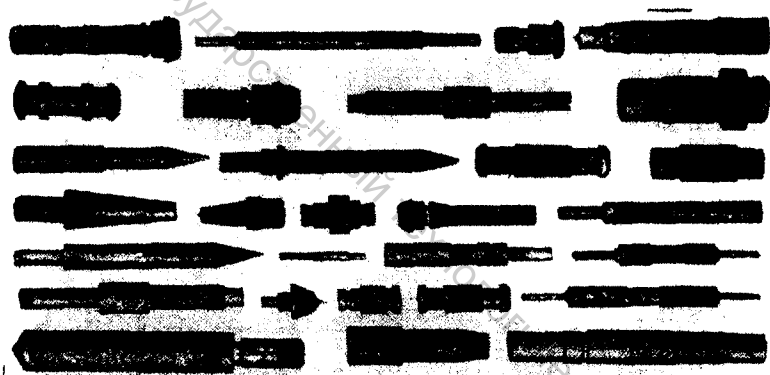
Поперечно-клиновую прокатку целесообразно применять при изготовлении деталей с программой выпуска более 10000 – 25000 шт. в год, т.е. при крупносерийном и массовом производстве. Конкретная величина минимальной программы выпуска зависит от коэффициента использования металла, его стоимости и размеров изделия. Дорогостоящие материалы целесообразно переводить на метод поперечно-клиновой прокатки при программах выпуска более 500 шт. При про-

граммах производства в среднем 1000 – 10000 шт. изделий целесообразно использовать штамповку.

### Поперечно-клиновья прокатка



а



б

Рис. 2.29. Изделия, полученные поперечно-клиновой прокаткой для последующей штамповки (а) и механической обработки (б)

*Раскатка* - весьма эффективный процесс формообразования заготовок, имеющих форму тел вращения. Сущность раскатки заключается в деформации металла между вращающимися валками-роliками. Существуют две разновидности процесса раскатки – открытая и закрытая (рис. 2.30).

Открытая раскатка (рис. 2.30,а) заключается в том, что предварительно отштампованная поковка 5 деформируется между обжимным 1 и опорным 2 роliками при их вращательном движении. Этот процесс аналогичен прокатке заготовки, у которой оба конца соединены между собой. По мере опускания обжимного

ролика 1 происходит непрерывное утонение кольца при одновременном увеличении его диаметра. Ролики 3 и 4 сигнализируют об окончании процесса раскатки в тот момент, когда наружная поверхность прокатываемого кольца одновременно касается контрольных роликов.

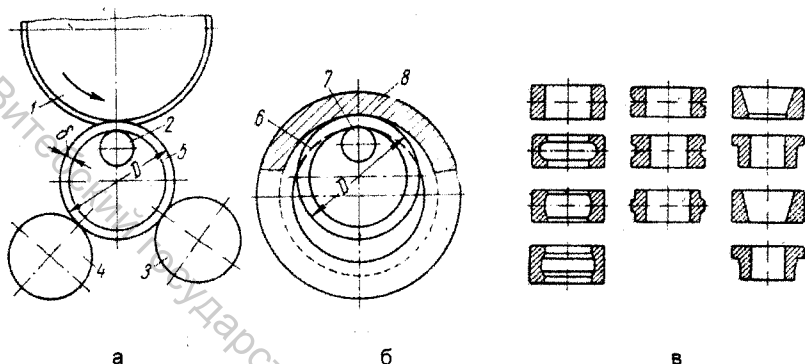


Рис. 2.30 Схемы открытой (а), закрытой (б) раскатки и раскатанные заготовки (в); 1 – обжимной ролик; 2 – опорный ролик; 3, 4 – контрольные ролики; 5 – поковка; 6 – полая заготовка; 7 – опорный ролик; 8 – обжимное кольцо

Закрытая раскатка (рис. 2.30, б) состоит в том, что полая заготовка 6 надевается на опорный ролик 7 и обжимается кольцом 8. Удаление готовых изделий при закрытой раскатке более сложно, чем при открытой. В связи с более простым осуществлением в промышленности нашла большее применение открытая раскатка.

Раскатка не является самостоятельным процессом обработки металлов давлением, так как заготовки для раскатки обычно получают штамповкой, ковкой (для крупных колец) или отливкой. Раскаткой получают поковки колец с наружным диаметром 70 – 700 мм, шириной 20 – 180 мм. Типовыми представителями являются заготовки для внутренних и наружных колец подшипников, различные втулки, муфты (рис. 2.30, в).

Размеры заготовок для раскатки определяются из условия равенства объемов заготовок до ( $V_3$ ) и после раскатки ( $V_{p,3}$ ) с учетом угара при нагреве под раскатку, на основании заданной степени обжатия  $k$ , считая высоту заготовок  $h_3$  до и после раскатки  $h_{p,3}$  постоянными:

$$k = 1,3 \div 1,6; h_3 = h_{p,3} \quad (2.14)$$



Наружный и внутренний диаметры цилиндрической кольцеобразной заготовки под раскатку в общем случае определяют по формулам:

$$D_3 = \frac{V_3}{\pi \kappa S_{p.3} h_{p.3}} + S_{p.3} \kappa, \quad (2.15)$$

$$d_3 = \frac{V_3}{\kappa S_{p.3} h_{p.3}} - S_{p.3} \kappa, \quad (2.16)$$

где  $S_{p.3}$  – толщина стенки кольцевой заготовки после раскатки

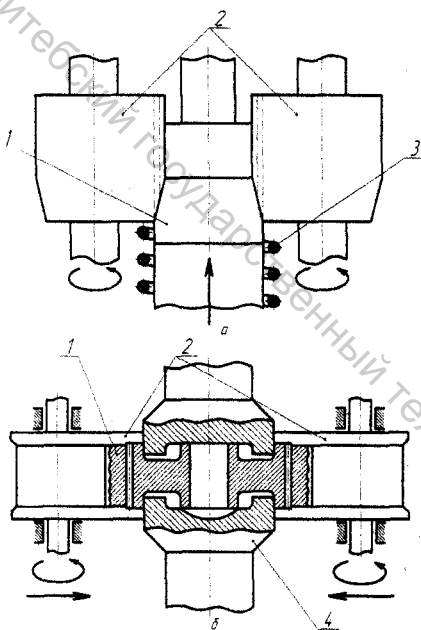


Рис. 2.31. Схемы накатки зубьев шестерен:

а - с осевой подачей заготовок, б - с радиальной подачей зубчатых валков. 1 – заготовка; 2 – зубчатые валки; 3 – индуктор; 4 – опорные кольца

Накатка зубчатых колес и звездочек. Горячую накатку зубьев производят двумя способами: с осевой подачей заготовок и с радиальной подачей зубчатых валков (рис. 2.31).

Зубчатые колеса с модулем менее 4 мм накатывают при осевой подаче заготовки 1 двумя валками 2, имеющими коническую заборную и цилиндрическую калибрующую части (рис. 2.31, а). Зубчатые валки устанавливают на определенное межцентровое расстояние, а заготовки, нанизанные на стержень в виде стопки и зажатые гидравлическим устройством, располагают точно посередине между валками. Заготовки перед прокаткой нагревают в кольцевом индукторе 3. Скорость осевой подачи заготовок

(2 – 10 мм/сек) выбирают так, чтобы за время прохождения через индуктор заготовка нагревалась до температуры прокатки (1200 °С).

Этот технологический процесс обеспечивает изготовление зубчатого венца с прямыми и косыми зубьями с точностью до 10 степени. Его применяют в тех

случаях, когда прокатанные шестерни работают при сравнительно невысоких скоростях.

Колеса с модулем 5 мм и выше накатывают при радиальной подаче двух валков (рис. 2.31, б). Нагретая заготовка зажимается между парой опорных колес 4. Зубья накатывают с припуском на обработку 0,5 – 1,5 мм на сторону. При прокатке на валки подается технологическая смазка. Реборды валков препятствуют вытеканию металла в торцы заготовки во время накатки.

*Накатка резьб* производится на двухвалковом и трехвалковом станках (рис. 2.32)

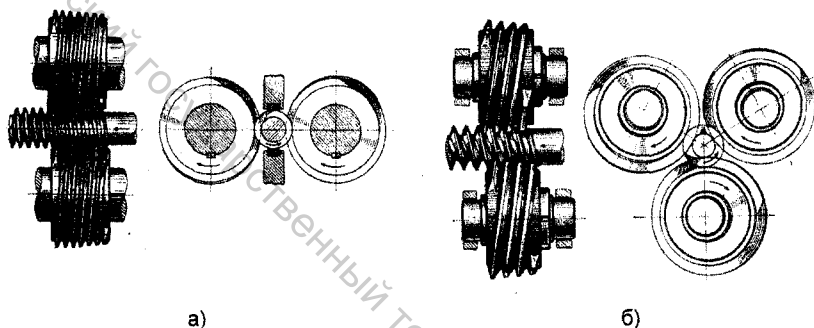


Рис. 2.32. Схемы накатки резьб: а - двухвалковая; б - трехвалковая

Валки имеют негативную нарезку по отношению к изделию. Устанавливаются валки под углом к оси заготовки, равным разности углов подъема винтового профиля на валке и на изделии. Нарезка на валках имеет заборный конус для облегчения захвата заготовки. Резьбы с шагом до 8 мм можно накатывать в холодном состоянии, с шагом более 8 мм - с нагревом до температуры накатки (1100 – 1200 °С).

### 2.15. Прессование

*Сущность процесса.* Прессованием называют процесс придания обрабатываемому металлу заданной формы посредством выдавливания его из замкнутого объема через канал, образуемый прессовым инструментом. Основным видом напряженного состояния деформируемого прессованием металла в пластической зоне является всестороннее неравномерное сжатие. Наряду с этим некоторые участки обрабатываемого объема металла вследствие неравномерности деформации имеют другой вид напряженного состояния – с растягивающими главными нормальными напряжениями. Тем не менее, при прессовании создаются более

благоприятные условия нагружения, чем при других видах обработки металлов давлением. Поэтому прессовать можно такие металлы и сплавы, которые в условиях прокатки или свободнойковки малопластичны и практически не обрабатываются.

В соответствии с видом взаимного перемещения прессуемой заготовки и контейнера различают прессование с прямым, боковым, обратным и совмещенным истечением. Наиболее распространено прессование с прямым истечением, которое применяется как для сплошных, так и для полых профилей (рис. 2.33).

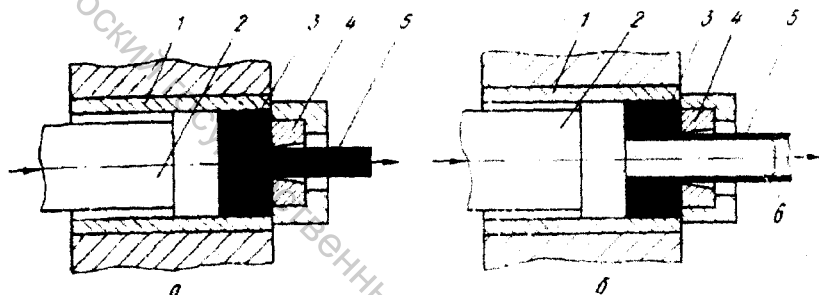


Рис. 2.33. Схемы прессования с прямым истечением:

а – сплошной профиль; б – полый профиль. 1 – контейнер; 2 – пресс-штемпель; 3 – заготовка; 4 – матрица; 5 – прессизделие; 6 – игла (оправка)

Металл заготовки 3, заложенный в контейнер (приемник) прессы 1, под действием сил, создаваемых движущимся в направлении стрелки пресс-штемпелем 2, выдавливается при прессовании сплошного профиля (схема а) в канал матрицы 4, а при прессовании полого профиля (схема б) – в замкнутый кольцевой канал, образованный матрицей 4 и иглой или оправкой 6. В результате получается заданное прессизделие 5 (сплошной или полый профиль), движущееся в процессе прессования в направлении, совпадающем с направлением движения пресс-штемпеля. Основная особенность этого способа прессования – обязательное, явно выраженное перемещение металла заготовки относительно неподвижного контейнера.

При прессовании труб или полых профилей по приведенной схеме в заготовке получают полость для оправки либо до ввода заготовки в контейнер, либо в самом контейнере прошивкой с образованием металлической «пробки», идущей большей частью в отход.

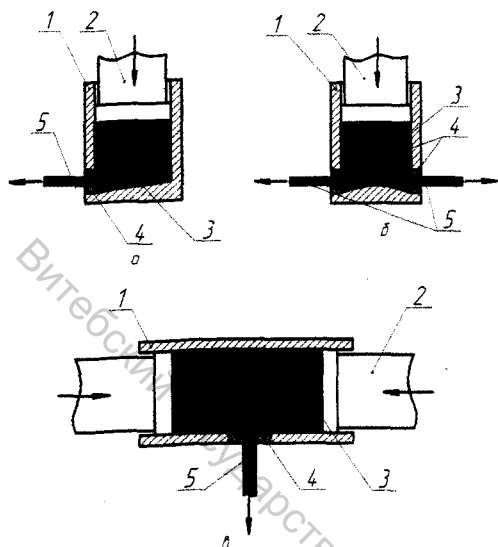


Рис. 2.34. Схемы прессования с боковым истечением:

а — с однониточным истечением; б — с двухниточным истечением; в — с двусторонним прессованием; 1 — контейнер; 2 — пресс-штемпель; 3 — заготовка; 4 — матрица; 5 — прессизделие

полых профилей. Прессование с обратным истечением применяется при прессовании относительно коротких сплошных и полых профилей (рис. 2.35).

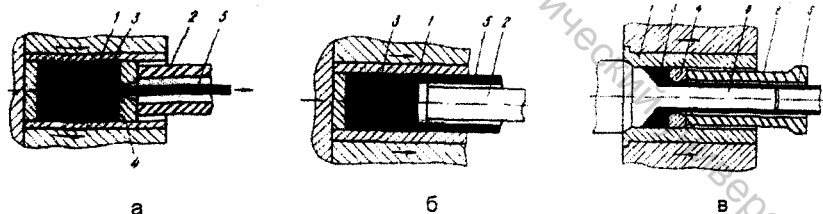


Рис. 2.35. Схемы прессования с обратным истечением:

а — сплошной профиль; б — гильза с дном; в — полый профиль; 1 — контейнер; 2 — пресс-штемпель; 3 — заготовка; 4 — матрица; 5 — прессизделие; 6 — оправка

Металл заготовки 3, заложенной в контейнер 1, под действием сил, создаваемых движущимся пресс-штемпелем 2, выдавливается при прессовании сплошного профиля в канал матрицы 4 (схема а); при прессовании гильзы с дном — в замкнутый кольцевой канал, образованный внутренней поверхностью контейнера и пресс-штемпеля 2 (схема б), а при прессовании трубы или полого профи-

Схемы процесса прессования с боковым истечением приведены на рис. 2.34.

Этот процесс отличается от процесса с прямым истечением только изменением направления истечения прессуемого металла примерно на  $90^\circ$ . Такое изменение направления истечения преследует ряд технических целей, например удобство приема прессизделия, удобство блокировки с последующим процессом при создании непрерывных поточных линий.

Прессование с боковым истечением может быть применено также для получения

ля— в замкнутый кольцевой канал, образованный внутренней поверхностью матрицы 4 и наружной поверхностью оправки (иглы) 6 (схема в). В результате получается заданное прессизделие 5, которое по схемам (а) и (в) проходит через полый пресс-штемпель 2, а по схеме (б) формируется между контейнером и сплошным пресс-штемпелем 2.

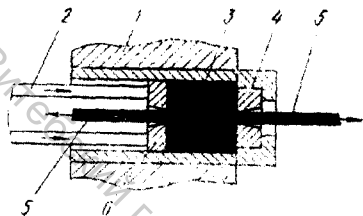


Рис. 2.36. Схема прессования сплошного профиля с прямым и обратным (совмещенным) истечением:  
1 – контейнер; 2 – пресс-штемпель; 3 – заготовка; 4 – матрица; 5 – прессизделие; 6 – пресс-шайба

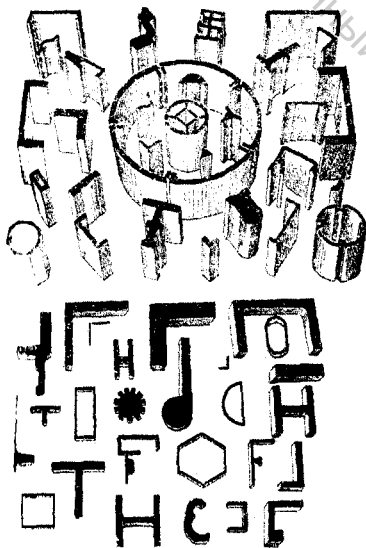


Рис. 2.37. Прессованные изделия

В прессах некоторых конструкций движется не пресс-штемпель, а контейнер. В обоих вариантах прессизделие во время прессования движется в направлении, обратном направлению движения пресс-штампеля относительно контейнера. Это послужило основанием к указанному наименованию процесса. Основная особенность этого способа прессования – отсутствие явно выраженного перемещения заготовки относительно контейнера.

Схема прессования с прямым и обратным (совмещенным) истечением сплошных профилей приведена на рис. 2.36. Металл заготовки 3 под действием пресс-штампеля 2 одновременно или разновременно (в зависимости от конструктивного выполнения) выдавливается через матрицу 4 и через пресс-шайбу 6. В первом случае имеет место прямое истечение, а во втором – обратное.

Сортамент прессизделий весьма обширен (рис. 2.37): прутки диаметром 3 – 250 мм, трубы диаметром 20 – 400 мм с толщиной стенки 1 – 1,5 мм и более, сложные профили, которые часто невозможно получить другими способами обработки давлением.

Особенно разнообразны профили из легких сплавов на основе алюминия и меди. Прессованием можно получать изделия с плавнопеременным и ступенчатым поперечными сечениями.

Плавнопеременное изменение наружных размеров достигается применением контейнера 1 с изменяющимся поперечным сечением (рис. 2.38, а). Плавнопеременное изменение внутренних размеров достигается применением конической оправки 5, перемещающейся вдоль своей оси (рис. 2.38, б). Этими методами можно прессовать полые и сплошные профили труб, уголков, швеллеров с плавноизменяющимися толщинами стенок (рис. 2.38, в, г).

Ступенчатое изменение поперечного сечения достигается путем циклического изменения положения оправки (рис. 2.39). Положение ступенчатой оправки на стадии формирования трубы с большим внутренним диаметром представлено на рис. 2.39, а. Стадия формирования трубы с меньшим внутренним диаметром представлена на рис. 2.39, б. Если эту стадию сделать короткой и периодически перемещать оправку вдоль своей оси, то в результате получится труба с внутренними поперечными утолщениями (рис. 2.39, в).

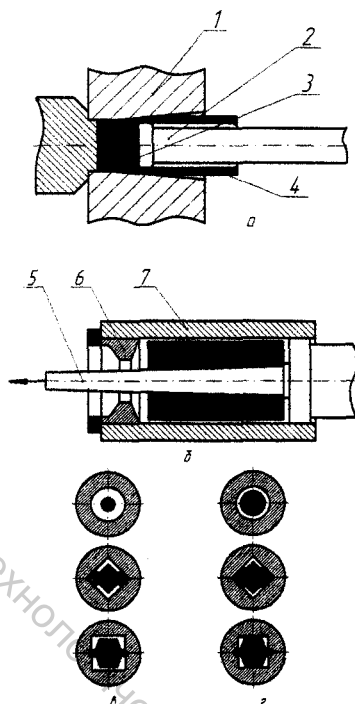


Рис. 2.38. Схема прессования изделий с плавнопеременным сечением: а – наружным; б – внутренним; в, г – положение инструмента соответственно при максимальных и минимальных размерах сечения; 1 – контейнер с переменным поперечным сечением; 2 – пресс-штампель; 3 – заготовка; 4 – прессизделие; 5 – коническая оправка; 6 – матрица; 7 – контейнер с постоянным поперечным сечением

Если на участке оправки с большим диаметром сделать пазы, параллельные оси, то в результате прессования с периодическим перемещением оправки получится труба с внутренним продольно-поперечным оребрением (рис. 2.39, г).

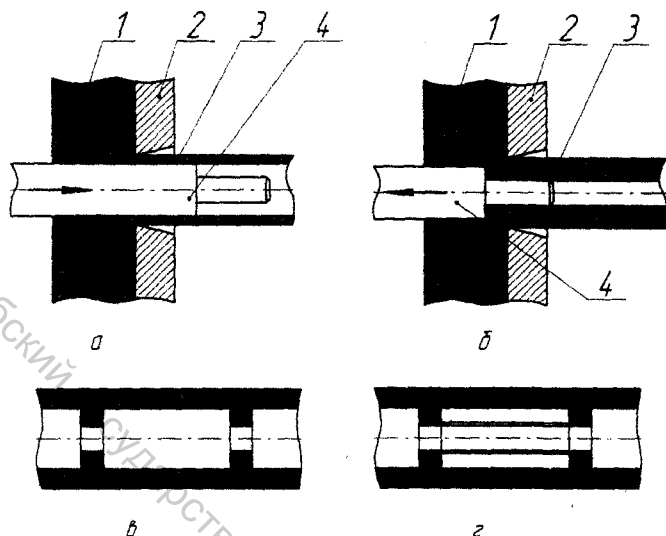


Рис. 2.39. Схемы прессования ступенчатых изделий: а, б – стадии прессования; в, г – виды изделий. 1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – прессизделие; 4 – ступенчатая оправка

Прессованию подвергают медь, латуни, бронзы, сплавы никеля, алюминия, цинка, магния, а также углеродистые, конструкционные, легированные, нержавеющие стали, жаропрочные сплавы, титан и его сплавы, тугоплавкие металлы, уран и торий.

Чаще всего прессуют слитки или катаную заготовку цилиндрической формы. Предварительно с поверхности удаляют обтачиванием поверхностные дефекты. Длину  $L$  и диаметр  $D$  заготовки выбирают, исходя из допустимой вытяжки  $\lambda$ , неравномерности деформаций и усилия пресса. Для готовых изделий должно быть  $\lambda \geq 10$ , для прочих  $\lambda \geq 5$ . При увеличении  $L/D$  возрастают потери на трение, усилие прессования и градиент температур по длине профиля. Обычно для полых профилей  $L/D = 1,5-2$ , для сплошных  $2-3$ . Напротив, при уменьшении  $L/D$  возрастают отходы металла. Диаметр заготовки обычно на  $2-3$  мм меньше диаметра контейнера, поэтому удастся легко ввести заготовку в контейнер. Если поверхностные дефекты на слитке глубокие, приходится срезать слой большей толщины, и зазор получается более допустимого. Поэтому перед прессованием или прошивкой слитков в контейнере распрессовывают для заполнения зазоров.

Оптимальная температура нагрева связана с пластичностью и прочностью металла, неравномерностью деформации, окислением поверхности, схватыванием (сваркой) металла с инструментом, скоростью остывания заготовки в контейнере и т. д. Температурный интервал прессования шире у однофазных сплавов и чистых металлов. Перед прессованием латуни, магниевых сплавов и др. применяется подогрев контейнера, матрицы и пресс-шайбы до 200—250 °С; а иглы — до 350 °С.

Скорости прессования (скорость движения пуансона) и скорости истечения (скорость выходящего прутка) изменяются в широких пределах: 0,2—50 мм/сек и 0,0017—17 м/сек соответственно. Как правило, с большей скоростью прессуют пластичные металлы и сплавы и металлы с высокой температурой нагрева.

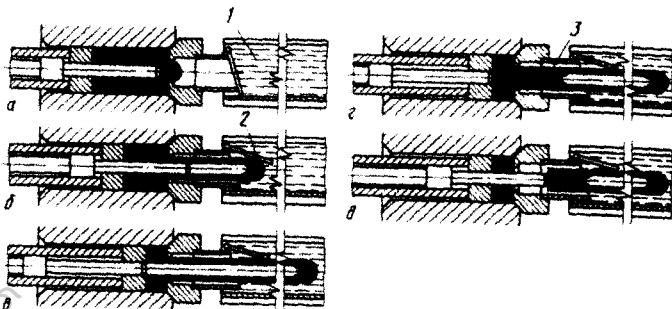
Технологическая смазка поверхности контейнера и пресс-шайбы уменьшает усилие прессования; скорость остывания заготовки; неравномерность деформации и удлиняет срок службы инструмента. Обычно в качестве смазки употребляют смесь графита с машинным маслом.

Для получения плотных изделий в контейнере всегда оставляют часть заготовки (пресс-остаток). Объем пресс-остатка увеличивается при неравномерном течении металла и составляет 5—15%. Передний конец прутка также приходится удалять из-за малой его деформации.

Заготовки после горячего прессования обычно подвергают травлению в кислотных ваннах, так как на их поверхности образуется слой окалины, снижающий качество изделий и затрудняющий последующую холодную обработку. Травление осуществляют в открытых ваннах, что, помимо безвозвратных потерь металла, достигающих 0,1—0,15 %, ухудшает санитарные условия работы в трубопрессовых цехах. Кроме того, при прессовании бухтовой трубной заготовки, имеющей длину 25—40 м при небольшом внутреннем диаметре, провести качественное травление ее внутренней поверхности практически невозможно.

Поэтому отработана и освоена технология безокислительного прессования заготовки. Схема и последовательность операций приведены на рис. 2.40. Заготовки в процессе прессования поступают в водяную ванну, расположенную непосредственно на выходе из матрицы. Прессование в воду обеспечивает получение трубной заготовки с неокисленной поверхностью, что позволяет исключить травление перед последующей холодной обработкой — прокаткой или волочением.





2.40. Схема безокислительного прессования трубной заготовки:

а — неполная прошивка слитка; б — начало процесса выдавливания; в — окончание процесса выдавливания; г — образование задней пробки; д — отделение изделия от пресс-остатка. 1 — приемная камера с водой; 2 — передняя пробка; 3 — задняя пробка

Процесс осуществляется в следующей последовательности. Нагретая заготовка помещается в контейнер и производится ее распрессовка для устранения зазора между заготовкой и контейнером, а затем иглой осуществляется неполная прошивка. В результате в заготовке образуется глухое отверстие с передней пробкой (рис. 2.40, а). Затем осуществляется совместное движение вперед пресс-штемпера и иглы. Игла входит в отверстие матрицы, а передняя пробка остается на переднем конце трубы (рис. 2.40, б). Изделие выпрессовывается в ванну с водой (рис. 2.40, в). На входе в ванну установлен гидрозатвор, исключающий вытекание воды при прохождении заготовки. Затем иглу выводят из канала матрицы. При движении пресс-штемпера образуется задняя пробка (рис. 2.40, г). Передняя и задняя пробки предотвращают попадание воды внутрь изделия. Процесс завершается движением иглы вперед, которая отделяет изделие от пресс-остатка (рис. 2.40, д).

## 2.16. Гидропрессование

Одним из перспективных технологических процессов объемного пластического деформирования является выдавливание жидкостью высокого давления (гидростатическое выдавливание, гидропрессование, прессование жидкостью, гидроэкструзия), представляющее собой разновидность прямого прессования, при котором передача давления на деформируемую заготовку осуществляется через жидкую среду. При этом заготовку помещают в контейнер, и она заходным концом перекрывает отверстие формообразующего инструмента — матрицы. Между

боковыми поверхностями заготовки и стенками контейнера имеется зазор. Канал контейнера заполняют рабочей жидкостью и перекрывают пуансоном.

На пуансоне и матрице установлены уплотнения. При перемещении пуансона давление жидкости возрастает, и при его определенном значении начинается истечение металла через отверстие матрицы. Давление жидкости на боковые поверхности заготовки обеспечивает устойчивость заготовки.

Высокое давление в рабочей камере контейнера может создаваться как перемещением в ней пуансона, так и внешним источником жидкости высокого давления, причем принципиального различия в силовом воздействии жидкости на заготовку между этими способами нет. Вместо жидкости могут применяться и другие передающие давления среды (стеклосмазка, графит, бингамовские пластики, свинец и др.), однако во всех случаях должно сохраняться основное условие, определяющее сущность выдавливания жидкостью: усилие на заготовку должно передаваться через жидкую или квазжидкую среду.

При выдавливании жидкостью реализуется наиболее благоприятная для увеличения технологической пластичности материала заготовки схема напряженного состояния — неравномерное всестороннее сжатие, при котором осуществляется режим жидкостного контактного трения между матрицей и заготовкой по всему очагу деформации или на его части, а также обеспечивается отсутствие контактного трения между заготовкой и стенками контейнера. Совокупность таких благоприятных условий деформирования значительно расширяет технологические возможности процесса объемного деформирования.

Основные способы выдавливания жидкостью показаны на рис. 2.41. Простое гидропрессование (рис. 2.41, а) сравнительно легко осуществимо и может применяться для пластичных, малопластичных и даже хрупких материалов. Получение больших деформаций при простом гидропрессовании высокопрочных материалов связано с необходимостью нагрева заготовок или повышением давления рабочей жидкости, которое в значительной мере ограничено прочностью контейнера. Следует также отметить, что при простом гидропрессовании иногда создаются определенные трудности в управлении процессом.

Гидропрессование с противодавлением — выдавливание жидкостью в жидкость (рис. 2.41, б) — характеризуется значительными трудностями в осуществлении из-за резкого возрастания давления в контейнере (на величину противодействия) и сложностью установок для ее осуществления. Этот способ можно ре-

комендовать только для хрупких материалов и в случае, когда отсутствуют другие способы деформации.

Главное преимущество выдавливания с приложением дополнительного усилия к торцу заготовки со стороны пуансона — гидромеханического прессования (рис. 2.41, в) — состоит в том, что создается возможность управления процессом.

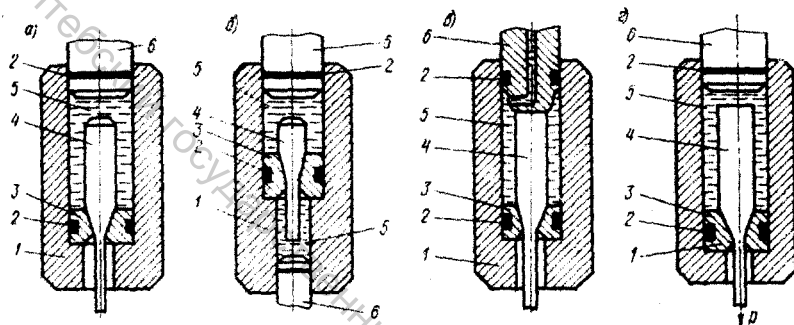


Рис. 2.41. Основные способы гидропрессования жидкостью: а — простое гидропрессование; б — гидропрессование с противодавлением; в — гидромеханическое прессование; г — гидропрессование с передним натяжением.

1 — контейнер; 2 — уплотнения; 3 — матрица; 4 — заготовка; 5 — жидкость; 6 — пуансон

Однако применение этого метода ограничивается длиной заготовки из-за возможного продольного изгиба пуансона и заготовки при большой их длине. Этот способ можно рекомендовать для сравнительно коротких заготовок большого поперечного сечения.

Гидропрессование с передним натяжением — волочением (рис. 2.41, г) — позволяет устойчиво управлять процессом. По сравнению с гидромеханическим прессованием деформирование с волочением имеет следующие преимущества: более простая конструкция установки; отсутствие ограничения на длину заготовки. По сравнению с простым гидропрессованием при прочих равных условиях прессование с натяжением происходит при меньшем давлении рабочей жидкости. Гидропрессование с натяжением применяется при производстве проволоки, труб и профилей.

Наибольшее распространение получило простое гидропрессование для изготовления прутков и проволоки из заготовок разного диаметра и длины как из одноименных (рис. 2.42, а, б), так и разноименных металлов (рис. 2.42, в).

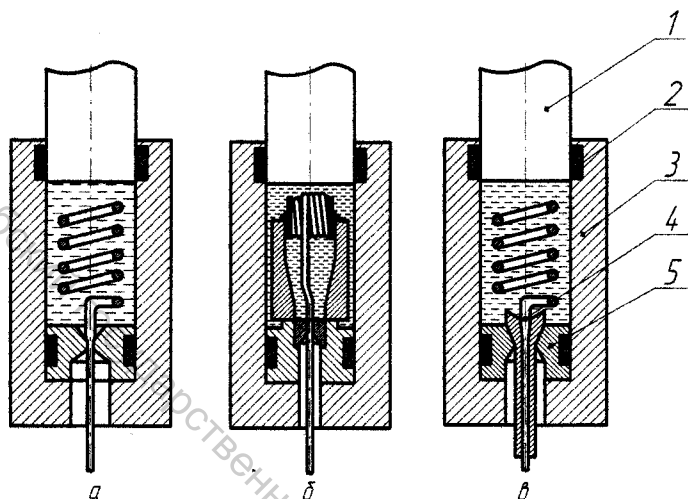


Рис. 2.42. Схемы гидропрессования проволоки из заготовки, свернутой в спираль (а), намотанной на катушку (б) и из биметаллической заготовки (в):

1 – плунжер; 2 – уплотнение; 3 – контейнер; 4 – заготовка; 5 – матрица

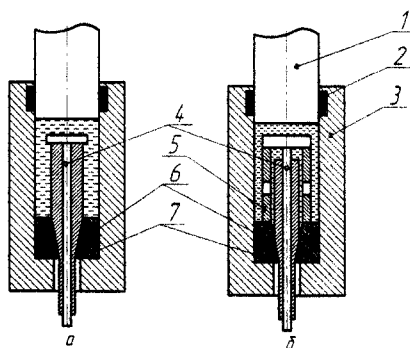


Рис. 2.43. Схемы гидропрессования труб на подвижной (а) и неподвижной (б) оправках: 1 – плунжер; 2 – уплотнение; 3 – контейнер; 4 – оправка; 5 – опора; 6 – уплотнение; 7 – матрица

Простое гидропрессование используется также для получения труб, причем процесс может осуществляться на подвижной (рис. 2.43, а) и неподвижной (рис. 2.43, б) оправках. Наиболее широкое промышленное применение при производстве труб из цветных металлов нашел процесс получения труб с использованием неподвижной оправки.

По температурному режиму процессы гидропрессования подразделяются на следующие виды:

- холодное прессование, осуществляемое без разогрева заготовки и рабочей жидкости;

- теплое прессование, осуществляемое при температурах 250— 500 °С и не выше температуры начала рекристаллизации деформируемого материала;

- горячее прессование, осуществляемое при температурах выше температуры рекристаллизации.

В основном применяется процесс холодного гидропрессования. Хрупкие тугоплавкие металлы (молибден, вольфрам) деформируются при температурах теплового прессования.

Горячее выдавливание жидкостью высокого давления применяется редко, что связано с трудностями в подборе рабочих жидкостей.

Важное значение для успешного протекания процесса гидростатического прессования имеет правильный выбор рабочих сред, смазок и смазочных покрытий.

Рабочая среда, передающая давление на заготовку, смазка и покрытие во многом определяют устойчивость процесса, рабочее давление и качество получаемых изделий. Применяемые при выдавливании рабочие среды можно разделить на три группы: 1) твердые (легкоплавкие металлы, порошки и др.); 2) газообразные (аргон); 3) жидкие (различные масла, вода и др.).

Квазизидкие среды (твердые и газообразные) применяются, главным образом, при горячем выдавливании.

При холодном гидропрессовании или с незначительным подогревом заготовки (до 250— 300 °С) используют жидкие среды. К рабочей жидкости предъявляются следующие требования: она должна обладать небольшой сжимаемостью при высоких давлениях, мало изменять вязкость при повышении давления; хорошо смазывать контактирующие поверхности; обладать антикоррозионными свойствами; быть нетоксичной и невоспламеняемой. Для технологических процессов прессования жидкостью высокого давления из всех свойств жидкостей наибольшее значение имеют изменение вязкости и сжимаемость жидкости под воздействием высокого давления.

Резкое возрастание вязкости жидкости при определенных давлениях и возможность при этом перехода жидкости в твердое состояние приводят к нестабильности процесса, прерывистому движению, ухудшению поверхности и даже полному разрушению изделия. Поэтому выбор рабочей жидкости, прежде всего,

определяется тем давлением, при котором происходит изменение агрегатного состояния вещества.

При давлении  $p < 800$  МПа могут быть применены трансформаторное, касторовое и индустриальные масла; при  $p < 1500$  МПа — эти же масла с добавлением в различных пропорциях бензина, керосина, этилового спирта; при  $p > 1500$  МПа — смесь глицерина с этиленгликолем. При деформировании с предварительным подогревом заготовки до  $400\text{--}500$  °С в качестве рабочей жидкости используют полиметилкилоксановые жидкости типа ПМС или вакуумное масло в смеси с бензином.

В процессе прессования гидродинамический режим трения на всем протяжении очага деформации наблюдается лишь в отдельных случаях. Чаще всего трение по длине очага деформации меняется от гидродинамического к граничному. Для предотвращения схватывания, налипания необходимо применять дополнительно технологические смазки. Хорошими смазочными свойствами обладает дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ). Для углеродистых сталей применяют также омеднение, фосфатирование, кадмирование, цинкование, алюминирование.

Задача выбора рабочей жидкости и смазки должна решаться комплексно, с учетом температурно-скоростных условий деформации материала, геометрии изделия и требований к качеству поверхности получаемых изделий.

*Скоростной режим* определяется технологической схемой гидропрессования и техническими возможностями приемного устройства установки. В связи с отсутствием контакта между плунжером и заготовкой скорость перемещения заготовки и плунжера не равны между собой. Скорость перемещения плунжера выбирается на основании технической характеристики установки (пресса), а скорости перемещения заготовок и истечения изделий определяются по приведенным ниже формулам.

Если принять, что при установившемся процессе гидропрессования давление постоянно и объем жидкости не изменяется, то можно приравнять секундные объемы перемещения рабочей жидкости, исходной заготовки и выдавливаемого изделия (рис.2.44):  $Q_1 = Q_2 = Q_3$ .

При этом

$$\text{а) } Q_1 = V_{\text{п}} \frac{\pi D_{\text{п}}^2}{4}; \text{б) } Q_2 = V_3 \frac{\pi D_{\text{н}}^2}{4}; \text{в) } Q_3 = V_{\text{и}} \frac{\pi d_{\text{к}}^2}{4}, \quad (2.17)$$

где  $Q_1$  - секундный объем перемещения рабочей жидкости;  $Q_2$  - секундный объем перемещения исходной заготовки;  $Q_3$  - секундный объем выдавливаемого изделия;  $V_n$  - скорость движения плунжера;  $V_3$  - скорость движения заготовки;  $V_n$  - скорость истечения выдавливаемого изделия;  $D_p$  - внутренний диаметр контейнера;  $D_n$  - диаметр заготовки;  $d_k$  - конечный диаметр изделия,

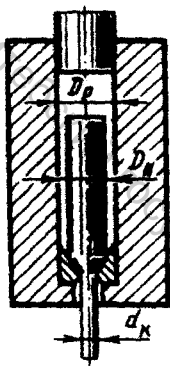


Рис. 2.44. Схема для расчета скорости истечения изделия

откуда

$$V_n = V_n \frac{D_p^2}{d_k^2} \quad \text{или} \quad V_n = V_3 \frac{D_n^2}{d_k^2} = V_3 \mu, \quad (2.18)$$

где  $\mu$  - вытяжка, так как

$$V_3 = V_n \frac{D_p^2}{D_n^2}, \quad \text{поэтому} \quad V_n = V_n \frac{D_p^2}{D_n^2} \mu. \quad (2.19)$$

Последняя формула наиболее удобна для вычисления скорости истечения, так как значения  $V_n$  и  $D_p$  определяются технической характеристикой пресса, на котором осуществляется гидроэкструзия, а значениями  $D_n$  и  $\mu$  можно варьировать.

В начале гидропрессования значения давления всегда выше давления на установившейся стадии процесса, и при этом часто возникает прерывность истечения, выражающаяся в нарушении плавности процесса и приводящая к дефектам на поверхности изделий. Предполагается, что более высокое начальное давление возникает вследствие различия между трением покоя и трением движения. Применяя эффективную смазку, придавая заготовке и матрице оптимальную форму, используя скорость движения плунжера выше минимально необходимой, можно устранить указанное явление. Минимально необходимая скорость движения плунжера, при которой устраняется прерывистость истечения для экспериментальных установок, равна 8 мм/с, а для промышленных - от 17 до 33 мм/с.

При сбросе давления в контейнере в момент выхода из матрицы конца прессуемого изделия большая часть потенциальной энергии сжатой жидкости переходит в кинетическую и при этом происходит так называемый «выстрел».

В связи с этим проблема торможения изделия при окончании процесса гидропрессования становится весьма актуальной, так как скорость истечения выходящего изделия может достигать 180-200 м/с, а в некоторых случаях даже дохо-

доть до 500 м/с. Это обстоятельство должно обязательно учитываться при проектировании технологического процесса и разработке конструкции прессовой установки. В настоящее время известно много способов торможения изделия при окончании процесса гидропрессования. Наибольшее практическое значение имеют следующие способы торможения изделий (рис. 2.45).

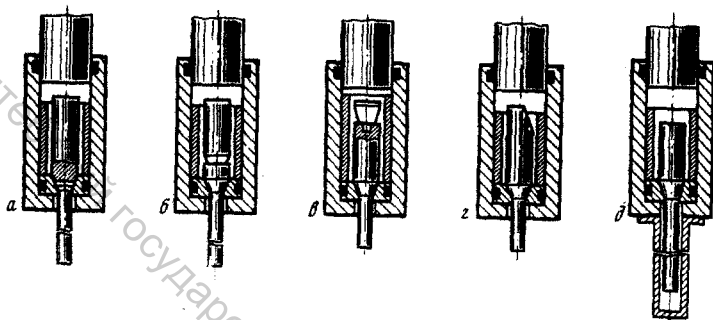


Рис. 2.45. Способы торможения изделий при гидроэкструзии

**а** — способ фиксации определенного остатка заготовки в матрице;

**б** — способ частичного выдавливания заготовки с последующим ее продавливанием очередной заготовкой; **в** — способ отсекаания рабочей жидкости пробкой; **г** — способ сброса давления рабочей жидкости; **д** — способ с тормозящей трубой

Способ фиксации определенного остатка заготовки в матрице (меньше длины конической части матрицы) с последующим его выдавливанием очередной заготовкой (рис. 2.45, а). Указанный способ используется для заготовок большого диаметра. При этом упрощается уборка готовых изделий от пресса и экономится металл, так как остатки отсутствуют.

Способ частичного прессования заготовки с последующим ее продавливанием очередной заготовкой (рис. 2.45, б). Этот способ используется для заготовок большого диаметра. Он позволяет упростить уборку изделий после гидропрессования и исключить потери металла на остатки заготовок в матрице.

Способ установки на торцевой части заготовок пробок с центрированием по выступу (для заготовок большого диаметра), впадине (для заготовок малого диаметра) или другим способом, которые перекрывают входную часть матрицы до выхода из нее изделия (рис. 2.45, в). Этот способ имеет ряд недостатков, является несовершенным, однако часто используется в промышленных установках зарубежных фирм.



Способ сброса давления рабочей жидкости перед завершением процесса путем сверления отверстий, нанесения прорезей и лысок на концевой части заготовок (рис. 2. 42, г). Этот способ можно рекомендовать для гидропрессования изделий с передним натяжением из заготовок небольшого диаметра. К недостатку этого способа следует отнести повышение трудоемкости подготовки заготовок.

Способ с использованием тормозящей трубы, наполненной жидкостью (рис. 2.45, д), сложен и применяется крайне редко.

По сравнению с обычным прессованием жестким пуансоном гидропрессование имеет следующие преимущества.

1. Благодаря наличию по всей длине очага деформации или ее части, режиму жидкостного трения и отсутствию трения заготовки о стенки контейнера обеспечивается равномерное течение металла. Деформирование в условиях малых сил трения улучшает схему напряженно-деформированного состояния, снижает возможность появления зон с растягивающими напряжениями, что позволяет обрабатывать малопластичные и даже хрупкие материалы, способствует более полному использованию ресурса пластичности материалов.

2. Вследствие уменьшения сил контактного трения давления деформирования снижаются на 20—40% и повышается стойкость инструмента, что позволяет обрабатывать материалы с высокими значениями сопротивления деформации.

3. Отсутствие контакта недеформируемой части заготовки с контейнером позволяет деформировать заготовки различных размеров поперечного сечения из одного контейнера.

4. Отсутствие осадки в начале прессования, которая происходит в обычном процессе, очень важно для малопластичных материалов, у которых ресурс пластичности может быть полностью или в значительной степени использован уже на стадии подпрессовки.

5. Выдавливание жидкостью обеспечивает более равномерное распределение структуры и свойств по сечению детали, а также улучшает физико-механические характеристики металла. Применительно к ряду материалов (тугоплавкие металлы, инструментальные стали и др.) появляется возможность формирования качественно новой структуры, обеспечивающей комплекс таких физико-механических свойств, которые невозможно получить другими методами обработки.

6. Возможность проведения деформирования в холодном и теплом состояниях (ниже температуры рекристаллизации), что особенно важно для химически активных металлов. Деформация в холодном (теплом) состоянии позволяет исключить окисление и газонасыщение металлов, а также снизить потери на угар.

Таким образом, выдавливание жидкостью позволяет более полно использовать пластические свойства материалов, расширяет технологические возможности процессов деформирования, способствует улучшению свойств получаемых изделий. Методом выдавливания жидкостью получают профили самой различной конфигурации, с точностью выполнения размеров по диаметру по 9—10-му качествам, с хорошим качеством поверхности ( $Ra = 0,32 - 1,25$  мкм).

Накопленный производственный опыт и результаты научно-исследовательских работ показывают, что применение процессов прессования жидкостью целесообразно в следующих случаях.

1. При деформировании малопластичных материалов (молибден, вольфрам и др.).

2. При получении деталей, у которых необходима максимальная равномерность и повышенный уровень физико-механических свойств.

3. При формообразовании деталей сложного поперечного сечения, которые другими методами обработки металлов давлением изготовить технически невозможно или экономически нецелесообразно. Методом гидропрессования получают сплошные и полые изделия со сложным наружным и внутренним профилем, в том числе и детали со спиральными ребрами.

4. При изготовлении биметаллических изделий с тонким наружным слоем (например, алюминиевых шин и проволоки с медным покрытием); в этом случае малые силы трения в очаге деформации не разрушают напрессовываемый тонкий наружный слой металла.

5. При получении из намотанной на катушку заготовки очень тонкой проволоки, так как при деформировании жидкостью возникают значительно меньшие, чем при волочении, растягивающие напряжения на выходе из очага деформации.

6. При изготовлении тонкостенных труб и профилей из тонкостенных заготовок.

## **2.17. Волочение**

*Волочение* – процесс обработки металлов давлением, заключающийся в протягивании заготовки постоянного поперечного сечения через плавно сужаю-

щийся канал волокни. Так как размеры сечения канала, а в отдельных случаях и его форма изменяются по длине канала, заготовка, протягиваясь через волоку, деформируется и принимает форму и размеры наименьшего сечения канала. При этом площадь поперечного сечения заготовки уменьшается, а длина увеличивается.

Волочением обрабатывают самые различные материалы: стали, алюминий, медь, никель, титан и сплавы на их основе; тугоплавкие металлы (молибден, вольфрам, ниобий, цирконий) и их сплавы; благородные металлы (золото, серебро, платину) и сплавы на их основе. С использованием процесса волочения получают круглую проволоку диаметром 0,008 – 17 мм; проволоку квадратного, прямоугольного, шестиугольного и других сечений; прутки и трубы круглые диаметром 0,3 – 500 мм со стенками толщиной 0,05 – 25 мм; фасонные профили с различной формой поперечного сечения и самых разных размеров (рис. 2.43).

Заготовки для волочения высокопластичных металлов, например, алюминия, меди, изготавливают путем непрерывного литья и прокатки. Для получения заготовок малопластичных сплавов, например, титановых, волочение которых представляет определенные трудности, заготовку после горячей прокатки подвергают теплой прокатке. В мелкосерийном производстве заготовки для волочения изготавливают методом горячего прессования.

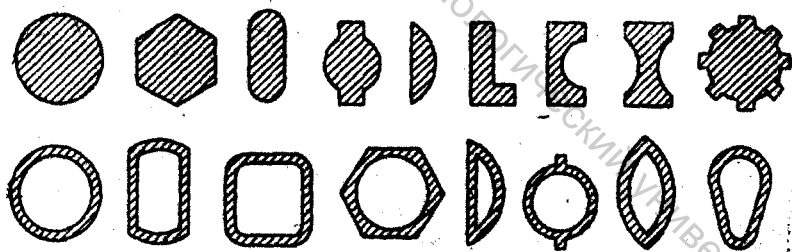


Рис. 2.43. Профили, получаемые волочением

Выбор способа изготовления заготовки для волочения фасонных профилей зависит от ее конфигурации и серийности производства. Если заготовка имеет простое поперечное сечение (круг, квадрат, прямоугольник) и производство крупносерийное, то наиболее рациональный способ ее получения – сортовая прокатка. Если заготовка имеет сложную конфигурацию поперечного сечения и производство мелкосерийное, то ее целесообразно получать прессованием. При мел-

косерийном производстве даже простые профильные заготовки иногда целесообразно изготавливать прессованием, так как при этом затраты на изготовление инструмента и его переналадку при переходе с одного изделия на другое значительно меньше, чем при сортовой прокатке.

Термическая обработка металла перед волочением снимает наклеп и придает металлу необходимые пластические свойства. Способ термической обработки выбирается также с учетом придания металлу необходимых механических и других характеристик в процессе его последующей пластической деформации. В зависимости от химического состава стали и назначения изделий волочения применяют отжиг, нормализацию, закалку, патентирование.

Последний вид термической обработки — патентирование — применяют для углеродистых сталей, поскольку в данном случае обеспечивается получение сорбитной структуры металла с равномерным распределением цементита в основной массе ферритных зёрен. Это способствует устойчивости самого процесса волочения и получению изделий высокой прочности. Процесс патентирования состоит в нагреве металла выше критической точки и охлаждении его в средах, имеющих температуру 450—500° С. В качестве таких закалочных сред используют расплавленный свинец или соли. Обычно патентирование осуществляется в непрерывных проходных установках.

В процессе получения готового изделия волочением термическая обработка для снятия наклепа может выполняться несколько раз в зависимости от размеров исходного и конечного продуктов обработки и окончательных его качественных показателей.

Окалину после термической обработки удаляют механическим, химическим, электрохимическим способами, а также их комбинацией.

Механическая очистка состоит в периодическом изгибании полосы между роликами, обдуже дробью или песком. Такой способ малоэффективен для удаления прочной окалины. Поэтому чаще применяют химический способ. Стальную заготовку травят в серной, соляной кислоте или в смеси кислот; медь, латунь, никель — в серной кислоте. При электролитическом травлении заготовка служит анодом, окалина частично восстанавливается, но большая часть ее отрывается от металла бурно выделяющимся водородом. После травления заготовка промывается и на ее поверхность наносится подмазочный слой путем желтении, омеднения, фосфатирования, известкования.

При желтении на заготовку наносится тонкий слой гидрата окиси железа  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , который вместе с известью играет роль наполнителя для смазки. Фосфатирование состоит в нанесении пленки фосфатов  $\text{Mn}$ ,  $\text{Fe}$  или  $\text{Zn}$ . К пленке фосфатов хорошо прилипает смазка, и коэффициент трения снижается до величины 0,04—0,06. Известкование в растворе нейтрализует остатки кислот и образует пленку наполнителя для смазки. Для волочения с большими обжатиями и давлениями рекомендуется омеднение заготовки в растворе купороса, коэффициент трения при этом равен 0,08—0,12. После нанесения покрытия заготовка сушится в камере при 300—350°C.

Волочение труб выполняют на оправке и без оправки (рис. 2.44).

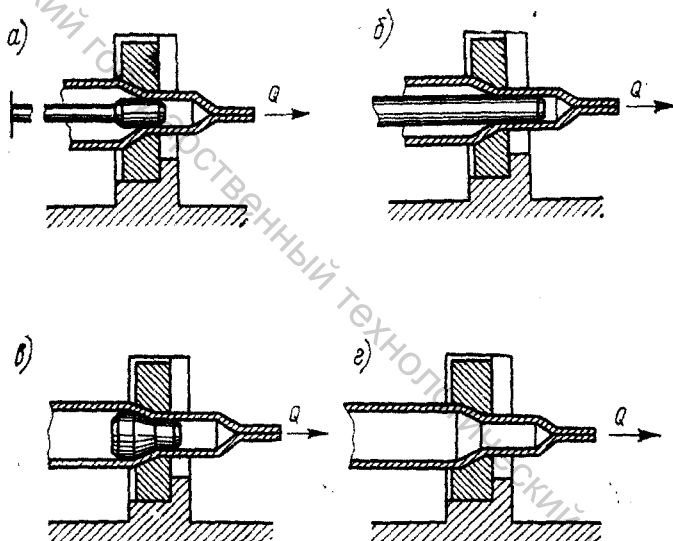


Рис. 2.44. Способы волочения труб:

а — на короткой неподвижной оправке; б — на длинной подвижной оправке; в — на плавающей оправке; г — без оправки

При волочении труб на оправке всегда имеет место уменьшение диаметра и утонение стенки трубы. По этой причине вытяжка может достигать значительной величины, например, при волочении на длинной движущейся оправке вытяжка составляет 2 и более.

Волочение на плавающей оправке широко распространено при производстве медных труб. Этот способ волочения имеет ряд преимуществ: длина трубы

не имеет ограничений, так как может применяться намотка на барабан в бухту; уменьшаются потери времени на вспомогательные операции.

При волочении без оправки наблюдается уменьшение наружного и внутреннего диаметров трубы. В зависимости от формы очага деформации и от степени изменения диаметров стенка трубы может сохраняться неизменной, но может утолщаться или утоняться.

#### Волоочильный инструмент

К нему относятся волок и оправки. Канал волок имеет следующие основные зоны (рис. 2.45). *Входная* — наиболее широкая часть канала волок предназначена для облегчения ввода в нее заготовки и подачи смазки;

*смазочная и рабочая*, в которых происходит деформация протягиваемого металла; эти зоны чаще объединяются в одну и называются рабочей зоной;

*калибрующая*, в которой придаются окончательные размеры и форма изделия в соответствии с заданной точностью;

*выходная* — служащая для предотвращения повреждений, задигов, царапин и пр. при выходе протянутого изделия из волок.

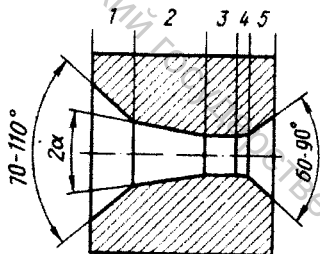


Рис. 2.45. Основные зоны волок:  
1 — входная; 2 — смазочная и рабочая; 3 — калибрующая; 4 — обратный конус; 5 — выходная

Основные геометрические характеристики волок — угол  $\alpha$ , составленный образующей рабочей зоны волок с осью канала, и длина калибрующей зоны. Для изготовления волок используют натуральные и синтетические алмазы, твердые сплавы и инструментальные стали. Качество волок определяет экономику процесса волочения и свойства получаемой продукции.

В процессе волочения инструмент испытывает значительные нагрузки вследствие высоких давлений от деформируемого металла и значительных сил трения. Поэтому показателями качества волок являются стойкость от истирания, раскола и величина силы волочения. Эксплуатационная стойкость волок оценивается количеством протянутого металла до выхода волок из строя, а стойкость волок до износа — количеством продукции на единицу износа канала, например на 1 мкм. Высокая стойкость волок и уменьшение силы волочения достигаются

применением для волок специальных материалов, установлением оптимальной формы и высококачественной отделкой канала волок, а также применением соответствующей смазки.

По конструкции волокна могут быть *монолитными* и *составными*. Составные волокна (рис. 2.46) образуются несколькими сопряженными частями и применяются в основном для волочения фасонных профилей.

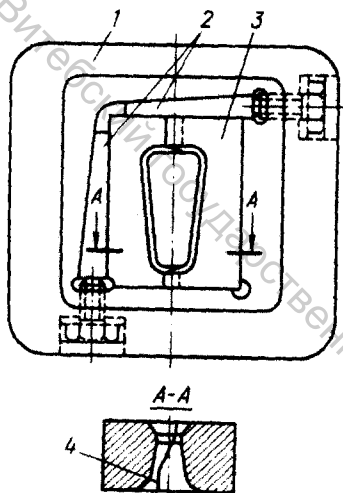


Рис. 2.46 Составная волока:

1 — обойма; 2 — установочные клинья; 3 — твердосплавная вставка; 4 — линия разреза

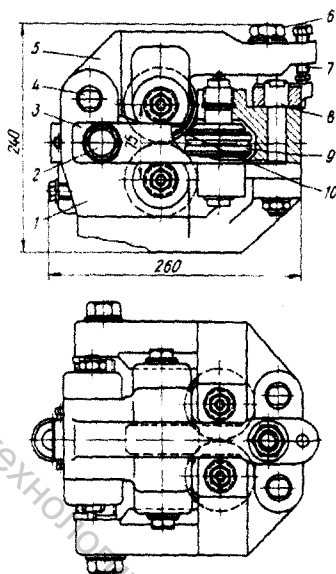


Рис. 2.47. Роликовая волока:

1 — основание; 2, 6 — стяжные болты; 3 — боковой рычаг; 4 — ось верхнего рычага; 5 — верхний рычаг; 7 — регулировочный болт; 8 — ось бокового рычага; 9 — вертикальный ролик; 10 — горизонтальный ролик

Достоинства составных волок — универсальность, большая стойкость на износ и простота ремонта изношенных вкладышей, возможность применения для изделий крупных сечений относительно небольших вкладышей из твердых сплавов, обеспечивающих значительно большую стойкость, точность готового профиля и скорость волочения. Этими преимуществами окупается более высокая стоимость составных волок по сравнению с монолитными волокнами из стали. По сравнению с монолитными волокнами из твердых сплавов стоимость таких волок, в особенности больших размеров, несколько ниже.

К составным волокам относятся также роликовые и дисковые волокни. Роликовые волокни применяют для волочения круглой проволоки. Они состоят из двух пар вращающихся роликов, расположенных перпендикулярно одна к другой (рис. 2.47).

Проволока, проходя через роликовые волокни, может деформироваться до 55 %, причем сила волочения будет значительно меньше, чем при волочении в монолитных волоках. Это достигается заменой трения скольжения в монолитных волоках на трение качения в роликовых волоках.

К преимуществам роликовых волок также относятся меньшая потребляемая мощность; повышенная скорость при той же мощности; увеличение обжатия за один переход и увеличение количества переходов между отжигами; сокращение числа промежуточных отжигов и операций травления; возможность применения недефицитных смазок; улучшение физико-механических свойств проволоки. Эти преимущества особенно велики при волочении малопластичных и склонных к налипанию на инструмент металлов и сплавов.

В то же время роликовые волокни имеют недостатки, например, затруднена настройка роликов на размер, что вызывает необходимость проведения данной операции на специальном стенде и увеличивает количество отходов.

Дисковые волокни успешно применяют для изготовления прямоугольных, трапецеидальных и других фасонных профилей. Особенно выгодно и высокопроизводительно применение дисковых волок при волочении из катаной заготовки диаметром до 20 мм фасонных профилей в бухтах. Применение дисковых волок выгодно по следующим соображениям: возможно вести волочение на высоких скоростях; можно установить волокни на любом однократном барабане или цепном стане, допускаются большие общие обжатия, чем для обычных волок, за счет меньших потерь на трение; возможно получать профили с острой кромкой, например, Г-образный кант для горных лыж, которые невозможно изготовить в монолитных волоках.

После износа ролика или диска их перешлифовывают на меньший диаметр и вновь устанавливают для дальнейшей работы. Ролики и диски изготавливают из стали X12M или твердого сплава марок BK8, BK15. Последние позволяют в десятки раз повысить стойкость этого типа инструмента по сравнению со стальными дисками.



## 2.18. Особенности проектирования поковок

### Элементы поковки

Обозначения размеров и названия элементов поковки и приведены на рис.

2.48 и 2.49.

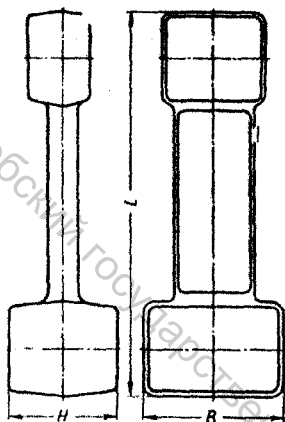


Рис. 2.48. Основные размеры поковки

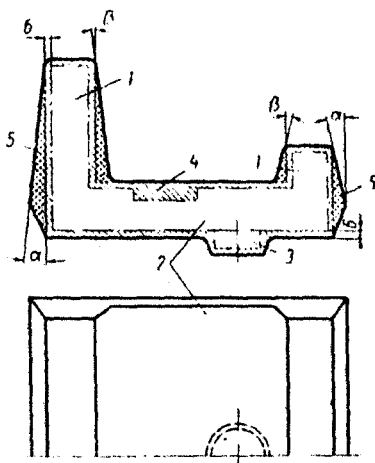


Рис. 2.49. Элементы поковки:

1-ребро; 2-полотно; 3-бобышка; 4-залив; 5-напуск; 6-припуск;  $\alpha$ -наружный,  $\beta$ -внутренний штамповочные уклоны

Размеры поковки: длина  $L$  – максимальный габаритный размер в плоскости разреза штампов; ширина  $B$  – максимальный габаритный размер поковки в полости разреза штампов, перпендикулярном ее длине; толщина  $H$  – высота поковки в направлении, перпендикулярном плоскости разреза штампов (рис. 2.48).

Элементы поковки (рис.2.49). *Полотно* – тонкая стенка поковки, штампуемая в горизонтальной плоскости. *Ребро* – тонкая стенка или выступ поковки, расположенные в вертикальной плоскости. *Бобышка* – выступ на поковке, длина которого равна ширине. *Припуск* – слой металла, срезаемый при обработке поковки на станках, обеспечивающий удаление дефектного, обезуглероженного слоя металла, получение требуемых размеров и заданной шероховатости поверхности готовой детали. *Напуск* – необходимый избыток металла, вызываемый особенностями технологического процесса формообразования поковки.

Разновидности напусков и их назначение:

- штамповочные уклоны необходимы для обеспечения свободного извлечения готовой поковки из рунца штампа;

- заливки применяют для упрощения формы полости чистового ручья штампа с целью создания условий, необходимых для предотвращения брака поковок, повышения стойкости ручья, а также для создания участков, обеспечивающих вырезку проб, требуемых для испытаний механических свойств;

- радиусы переходов ( $R$ ) в местах сопряжения отдельных элементов поковки, требуемые для предотвращения поверхностных дефектов на поковках в виде складок металла и трещин, облегчения течения металла;

- закругления ( $r$ ) – необходимы для уменьшения концентрации напряжений в углах дна полости чистового ручья.

#### *Покówki, штампуемые на молотах*

Выбор штамповочных уклонов. Штамповочные уклоны различают в зависимости от воздействия металла поковки на стенки ручья штампа при его остывании. Если металл отходит от стенки при остывании поковки в ручье штампа, то уклон называют внешним  $\alpha$ . Если же металл прижимается к стенке ручья, то его называют внутренним  $\beta$  (рис. 2.49). В целях сокращения расхода металла на напуски следует назначать двойные уклоны.

Двойные штамповочные уклоны также могут быть как внешними, так и внутренними. Они применимы главным образом на поковках, представляющих собой тела вращения. В некоторых случаях они могут быть применены и на поковках более сложной формы. Например, на отдельных участках коленчатых валов автомобильных двигателей, представляющих собой балансиры. Значения штамповочных уклонов в зависимости от соотношения габаритных размеров поковок приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Числовые значения штамповочных уклонов

| Отношение<br>Н/В или Н/Д | Штамповочные уклоны     |                          |                         |                        |
|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|
|                          | Обычные одинарные       |                          | Двойные                 |                        |
|                          | Наружные $\alpha^\circ$ | Внутренние $\beta^\circ$ | Основные $\alpha^\circ$ | Входные $\gamma^\circ$ |
| Св. 0,5 до 1,0           | 5                       | 7                        | 3                       | 7                      |
| Св. 1,0 до 2,5           | 7                       | 10                       | 3                       | 7                      |
| Св. 2,5 до 4             | 7                       | 10                       | 3                       | 7                      |
| Св. 4,0 до 5,5           | 7                       | 12                       | 5                       | 10                     |
| Св. 5,5                  | 10                      | 15                       | 5                       | 12                     |

При использовании таблицы 2.4. нужно учитывать следующие обстоятельства:

- если в отдельных местах поковки получаются различные штамповочные уклоны, то их надо унифицировать, приняв большее значение;
- если заполнение ручья штампа осуществляют за счет осадки заготовки (рис. 2.50, б), то штамповочные уклоны можно уменьшить до ближайшего меньшего значения.

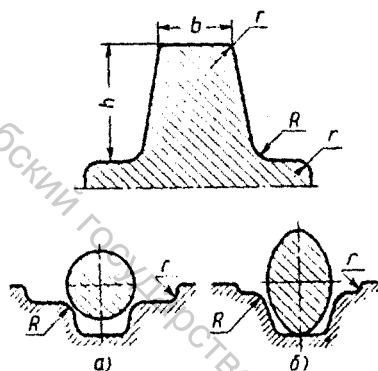


Рис. 2.50. Штамповка выдавливанием (а), осадкой (б)

Радиусы переходов и закруглений (рис. 2.50). назначаются в зависимости от отношения  $h/b$  – высоты элемента поковки  $h$  к ширине поковки  $b$  у искомого радиуса (табл. 2.5). При определении радиусов учитывают следующие положения:

Радиусы закруглений  $r$ , меньшие величины припуска, округляют до величины припуска.

Таблица 2.5

Числовые значения радиусов закруглений

| $h/b$     | $r$ при $h$ |         |       |        | $R$ при $h$ |         |       |        |
|-----------|-------------|---------|-------|--------|-------------|---------|-------|--------|
|           | До 25       | 24 - 45 | 46-80 | 81-100 | До 25       | 24 - 45 | 46-80 | 81-100 |
| До 2      | 1,5         | 2       | 3     | 4      | 5           | 8       | 12    | 15     |
| Св.2 до 4 | 2           | 3       | 4     | 4,5    | 6           | 10      | 15    | 20     |
| Св.4      | 2,5         | 3,5     | 4,5   | 5      | 8           | 15      | 20    | 25     |

При значении радиуса  $r$ , большем величины припуска, последний увеличивают до величины радиуса.

Если на чертеже готовой детали величины  $r$  и  $R$  больше получаемых по табл. 2.5, то их следует принимать по чертежу детали.

Следует принимать значения  $r$  и  $R$  по табл. 2.5, если они больше соответствующих размеров на чертеже готовой детали.

При штамповке высоколегированных сталей (30ХГСА, 24Х2МФА, 40ХНМА, 25ХНВА и др.) значения  $r$  и  $R$  принимают на 20—30% больше табличных.

*Полости и наметка отверстий.* При штамповке поковок с глухими отверстиями необходимо стремиться получить углубления максимального объема, что приводит к экономии металла и уменьшению механической обработки.

Неглубокая полость может быть образована тем легче, чем больше диаметр этой полости. Вследствие малой стойкости штамповых знаков полости диаметром менее 30 мм не выполняются. При большой высоте поковок ограничиваются получением лишь глубоких отверстий (наметок) без последующей прорезки отверстий. Верхняя наметка полости выполняется из условия получения глубины, равной двум диаметрам. Высота нижней наметки полости меньше верхней, т.к. стойкость нижнего знака меньше верхнего (из-за большего его разогрева). Чтобы обеспечить устойчивость заготовки при закладывании ее в ручей, нижний знак должен быть невысоким.

При штамповке поковок с наметкой отверстий приходится считаться с тем, что слишком толстые пленки тяжело срезать, а чрезмерно тонкие пленки нецелесообразны по затрате энергии, а также из-за снижения стойкости штамповых знаков. Если пленка получается большого диаметра и небольшой толщины, то для ее образования требуется затратить много энергии. В этом случае на первой стадии штамповки в черновом ручье целесообразно получать пленку между знаками с большими радиусами закруглений.

При штамповке в чистовом ручье применяют такие знаки, которые образуют в середине пленки магазин (карман). Металл с утолщенных мест пленки вытесняется в него, а сама пленка легко удаляется.

В зависимости от формы и размеров применяют пять типов наметок: с плоской пленкой, с раскосом, с магазином, с карманом, глухую (рис. 2.51).

При конструировании плоской наметки (рис. 2.51, а) большое значение имеет правильный выбор толщины пленки  $s$ . При штамповке в зоне пленки происходит осадка с боковым подпором. Давление на выступах, образующих пленку, зависит от отношения диаметра пленки к ее толщине. При малой толщине пленки давление велико и выступы штампа, образующие наметку, могут быстро подвергнуться деформации. Возможность деформации усугубляется еще и тем, что при малой толщине пленке быстро остывает, а это еще больше увеличивает давление на выступы. Причем выступы, окруженные раскаленным металлом, быстро нагреваются, а их твердость и прочность снижаются. При деформации выступов возможно застревание поковки в штампе.

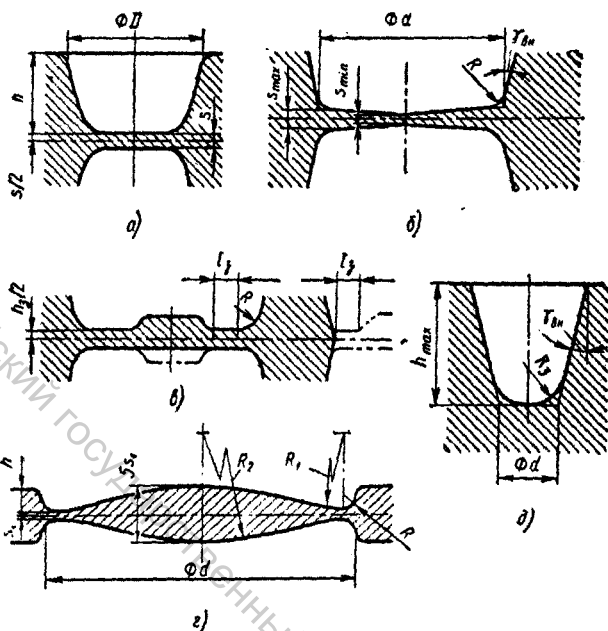


Рис. 2.51. Наметки молотовых поковок:

а – плоская; б – с раскосом; в – с магазином; г – с карманом; д – глухая

Вместе с тем при большой толщине пленки требуются повышенные усилия для ее последующей прошивки, которые могут значительно деформировать поковку и затруднить прошивку. Поэтому необходимо, чтобы толщина стенки в для определенных условий была оптимальной. Практически установлено, что отношение  $s/D = 0,1$  или  $s = 0,1D$ , но не менее 4 мм.

Плоскую наметку выполняют при  $D < 80$  мм. При использовании предварительного ручья плоскую наметку применяют до  $D < 55$  мм. Для  $D > 80$  мм при отсутствии предварительного ручья и для наметок в предварительном ручье любых диаметров применяют наметку с раскосом, облегчающим течение металла (рис. 2.51, б). Предварительно рассчитывают  $s$  как для плоской наметки, а  $s_{max} = 1,35s$  и  $s_{min} = 0,65s$ .

Наметку с магазином (рис. 2.51, в) применяют при  $D > 55$  мм при наличии предварительного ручья, в котором выполняют наметку с раскосом. В наметке с магазином уменьшается толщина пленки до  $h_3$ , что облегчает ее срез. При штам-

поковке в месте образования пленки не возникает повышенных давлений, так как металл вытесняется в полость магазина.

Наметку с карманом (рис. 2.51, з) применяют при  $D > 150$  мм и для низких поковок со сравнительно малым отношением  $h/D$  ( $< 0,07$ ). Толщина пленки в месте среза при прошивке  $s_1 = 0,4\sqrt{D}$ . Наметку с карманом применяют в основном при штамповке в окончательном ручье предварительно осажённых плоских заготовок.

Глухую наметку (рис. 2.51, д) выполняют для экономии металла, когда ее глубина  $h_{\max}$  и радиусы  $r$  относительно большие; в результате чего прошивка нецелесообразна и отверстие в дальнейшем получают сверлением.

#### *Поковки, штампуемые на кривошипных горячештамповочных прессах*

В зависимости от характера течения металла (осадка или выдавливание) и степени сложности конфигурации поковки нередко имеется возможность (при наличии выталкивателей у пресса) значительно уменьшить штамповочные уклоны (табл. 2.6).

Таблица 2.6

Числовые значения штамповочных уклонов при наличии выталкивателей

| Штамповочные уклоны  | Поковки тел вращения |              |                       | Поковки сложной (удлиненной формы) |                       |
|----------------------|----------------------|--------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|
|                      | Осадка               | Выдавливание | Осадка и выдавливание | Осадка                             | Осадка и выдавливание |
| Внешние $\alpha^0$   | 1 - 2                | 3 - 5        | 3 - 5                 | 3 - 5                              | 5 - 7                 |
| Внутренние $\beta^0$ | 2 - 3                | 5 - 7        | 5 - 7                 | 5 - 7                              | 5 - 7                 |

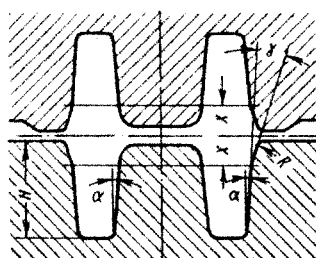


Рис. 2.52. Полость штампа с двойным штамповочным уклоном

выталкивателей штамповочные уклоны следует назначать, как и у молотовых штампов.

Для облегчения течения металла в полости ручья на поковках необходимо назначать радиусы переходов  $R$  и  $R_1$  (рис. 2.53), которые определяют по эмпири-

Если штамповку осуществляют одновременно осадкой и выдавливанием, то штамповочные уклоны на разных участках следует назначать отдельно с учетом характера течения металла. Если полости ручья очень глубокие и узкие, рекомендуется применять двойные штамповочные уклоны, которые предохраняют кромки ручья от деформации (рис. 2.52, табл. 2.7). В штампах без

ческой формуле  $R = kh$ . Коэффициент  $k$  назначают по таблице 2.8. При переменной  $h$  величину  $R$  следует определять по максимальному значению глубины  $h$ .

Таблица 2.7

Числовые значения двойных уклонов

| Глубина $H$ ручья в мм | Расстояние $x$ в мм | Штамповочные уклоны |                    |
|------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
|                        |                     | Основные $\alpha^0$ | Входные $\gamma^0$ |
| До 20                  | 5                   | 2                   | 6                  |
| Св. 21 до 50           | 10                  | 3                   | 7                  |
| Св. 51 до 60           | 12                  | 3                   | 10                 |
| Св. 66                 | 15                  | 5                   | 10                 |

Таблица 2.8

Числовые значения коэффициента  $K$

| $h/b$      | $h$          | $K$  |
|------------|--------------|------|
| До 1       | До 12        | 0,15 |
| Св. 1 до 2 | Св. 12 до 24 | 0,2  |
| Св. 2 до 3 | Св. 24 до 40 | 0,25 |
| Св. 3      | Св. 40       | 0,3  |

Обозначения:  $b$  и  $h$  – ширина и глубина участков поковки

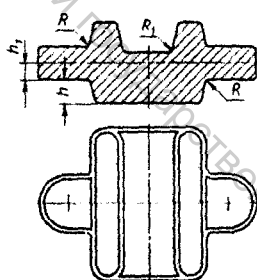


Рис. 2.53. Закругления поковок

Поковки, штампуемые на горизонтально-ковочных машинах

Наиболее удобны для штамповки на ГKM поковки, имеющие форму правильных или усложненных выступами тел вращения.

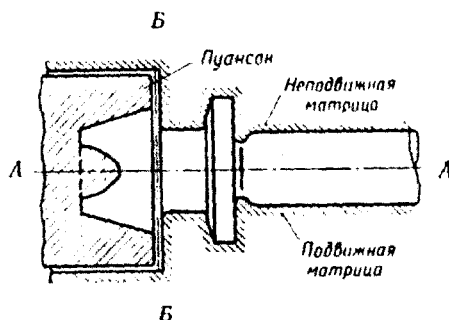


Рис. 2.54. Плоскости разреза поковки, штампуемой на ГKM

Форма поковки, предназначенной для высадки на ГKM, должна допускать разделение ее на три части по двум плоскостям разреза, из которых одна (А-А) обычно проходит через плоскость симметрии, а другая (Б-Б) перпендикулярна ей (рис. 2.54).

При разработке чертежей поковок руководствуются рекомендациями, приведенными в таблице 2.9 (рис. 2.55)

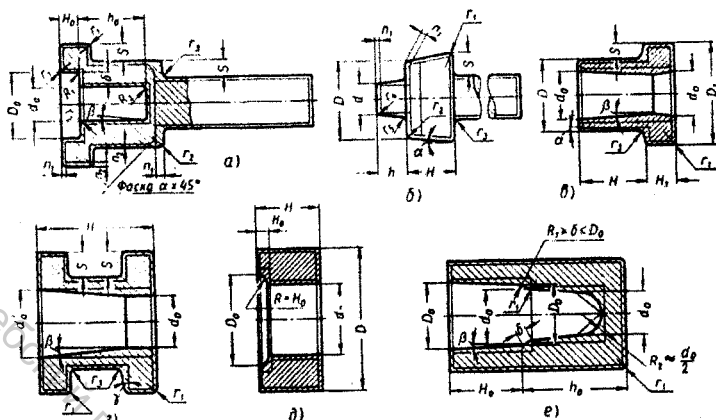


Рис. 2.55. Геометрические параметры поковок

Таблица 2.9

Соотношения геометрических параметров поволоков, штампуемых на горизонтально-ковочных машинах

| Конфигурация                                                                                                                                                                                                                                                               | Параметры                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |           |              |              |              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| <p>Вся внешняя конфигурация поковки расположена в матрице (штамповка в матрице), отсутствие участков с замкнутым с двух сторон контуром (рис. 2.55, а, д и е)</p> <p>Штамповка в матрице, наличие участков с замкнутым контуром по внешней конфигурации (рис. 2.55, е)</p> | <p><b>Внешние уклоны</b></p> <p>Штамповочные уклоны по наружному контуру не делать</p> <p>Штамповочные уклоны на внутренних сторонах буртиков определяют исходя из высоты <math>S</math> меньшего буртика</p>                                                                                                                                                        |           |              |              |              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                            | $S$ в мм                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | До 10     | Св. 10 до 30 | Св. 30 до 50 | Св. 50 до 80 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                            | $\gamma$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | $1^\circ$ | $3^\circ$    | $5^\circ$    | $7^\circ$    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                            | <p>Штамповочный уклон в минутах определяют по формуле</p> $\alpha = 15 \left( \frac{H}{D} - 0,3 \right); \text{ при } \frac{H}{D} \leq 0,3 \alpha = 0.$ <p>Округлять до ближайшего большего на следующего ряда: <math>10^\circ; 20^\circ; 30^\circ; 40^\circ; 50^\circ; 1^\circ; 1^\circ 10'; 1^\circ 20'; 1^\circ 30'; 1^\circ 40'; 1^\circ 50'; 2^\circ</math></p> |           |              |              |              |
| Элементы поковки, получаемые не высадкой, а выдавливанием (см. выступ диаметром $d$ на рис. 2.55, б)                                                                                                                                                                       | Деталь без штамповочных уклонов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |           |              |              |              |



Таблица 2.9 (продолжение)

| Конфигурация                                                                                                                | Параметры                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Внутренние штамповочные уклоны <math>\beta</math> при сквозной и глухой (несквозной) прошивке (рис.2.55, а, в, г, е)</p> | <p><b>Внутренние уклоны</b></p> <p>Определять по следующим формулам:</p> $\beta = 15 \left( \frac{H_0}{D_0} - 0.5 \right) \text{ мин};$ $\beta = 15 \left( \frac{h_0}{d_0} - 0.5 \right) \text{ мин};$ <p>при <math>\frac{H_0}{D_0} \leq 0.5</math> или <math>\frac{h_0}{d_0} \leq 0.5</math> <math>\beta = 0</math></p>                                                                                                        |
| <p>На выпуклых углах при отсутствии фаски (рис.2.55, а)</p>                                                                 | <p><b>Радиусы закруглений</b></p> <p>Радиус закругления <math>r_1</math> определяют исходя из величины среднего припуска:</p> $r_1 = n = \frac{n_1 - n_2}{2}$                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <p>На выпуклых углах при наличии фаски (рис.2.55, а) под углом <math>45^\circ</math></p>                                    | <p>Величина радиуса закругления</p> $r_2 = n + a = \frac{n_1 + n_2 + 2a}{2}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <p>Если фаска не под углом <math>45^\circ</math> или описана кривой</p>                                                     | <p>Величину <math>r_2</math> определяют графически так, чтобы в углу сохранялся нормальный средний припуск</p> $n_1 = n$                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <p>На вогнутых углах (рис. 2.55, а—г)</p>                                                                                   | <p>Величину <math>r_3</math> определяют в зависимости от величины уступа <math>S</math> со стороны закругления:</p> $r_3 = 0.2 S + 1;$                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <p>Для элементов, получаемых выдавливанием (выступ диаметром <math>d</math> на рис.2.55, б)</p>                             | <p> <math>r_4 = 0.1h + 1;</math><br/> <math>r_5 = 0.2h + 1.</math> </p> <p>Значения <math>r_1 - r_5</math>, полученные по приведенным выше формулам, округляют до ближайшего большего из следующего нормального ряда (в мм): 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 6; 8; 10; 12; 15 и далее через 5 мм.</p> <p>При <math>r_1 + r_5 &lt; S</math> или <math>r_4 + r_5 &lt; S</math> следует добиваться плавного сопряжения</p> |
| <p>На выпуклых углах</p>                                                                                                    | <p>Радиусы закруглений выбирают так же, как <math>r_1</math> и <math>r_2</math> для внешнего контура (рис.2.55, б).</p> <p>Для плавного сопряжения (рис.2.55, е) радиусы будут больше рассчитанных, подбирают графически</p>                                                                                                                                                                                                    |
| <p>На вогнутых углах</p>                                                                                                    | <p>Радиусы закруглений (рис.2.55, а)</p> $R_1 = 0.07 (D_0 + H_0);$ $R_2 = 0.07 (d_0 + h_0).$ <p>Полученные значения округляют до ближайшего большего по приведенному выше нормальному ряду</p>                                                                                                                                                                                                                                  |

Размеры  $s$  и  $t$  (рис. 2.56) поперечного (или развернутого) облоя выбирают по табл. 2.10.

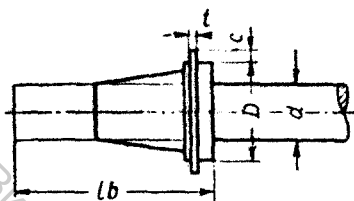


Рис. 2.56. Поковка с развернутым (поперечным) облоем

Выступы на поковках могут быть расположены как в осевом направлении, так и в боковом. При высадке легче, быстрее деформируется передний (обращенный к пуансону) конец заготовки, поэтому осевые и боковые выступы легче получать на переднем конце поковки (рис. 2.55, б)

Таблица 2.10

Геометрические размеры облоя

| D, мм     | s, мм | d, мм | t, мм |
|-----------|-------|-------|-------|
| До 20     | 5     | 25    | 1     |
| 21 - 80   | 8     | 50    | 1,5   |
| 81 - 160  | 12    | 75    | 2,0   |
| 161 - 260 | 14    | 100   | 2,5   |
| 261 - 360 | 16    | 125   | 3,0   |

Боковые выступы можно получить за счет вытеснения металла из прошиваемой полости. Труднее всего получать выступы на заднем (от пуансона) конце поковки. Достаточного объема металла для получения такого выступа можно достигнуть только посредством высадки с развернутым облоем (рис. 2.57), лежащим в осевой плоскости выступа. Продольные ребра на внешней поверхности полых детали, расположенные симметрично (рис. 2.58), можно штамповать на ГKM одновременно с глубокой прошивкой полости за счет вытеснения металла из этой полости при следующих условиях: а) площадь поперечных сечений заготовки должна быть равна соответствующим сечениям поковки; б) при  $b \leq 0,25 D$ ; в) при  $h \leq 0,6 b$ .

При определении конструктивных элементов поковки следует также иметь ввиду следующие рекомендации:

1. Необходимо задавать штамповочные уклоны: на цилиндрических участках поковки длиной более  $0,5 d$ , высаживаемых в полости пуансона, не менее  $0,5^\circ$  на сторону (рис. 2.59, а); на буртиках, формируемых в глубоких круговых впадинах матриц, не менее  $0,5 - 1,5^\circ$  на сторону (рис. 2.59, б); на стенках глубоких сквозных отверстий, прошиваемых пуансоном, в пределах  $0,5 - 3^\circ$  (рис. 2.59, в).

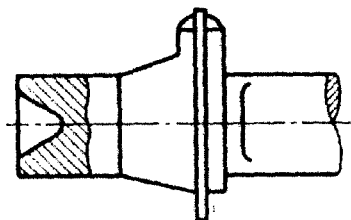


Рис. 2.57. Поковка с развернутым об-  
лоем в осевой плоскости

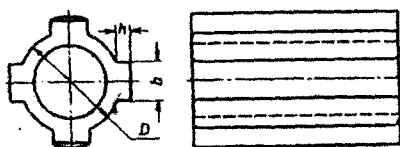


Рис. 2.58. Поковка полая с симметрич-  
ными продольными ребрами на внешней  
поверхности

2. Радиусы сопряжений должны быть выполнены не менее 2 мм (рис. 2.59, г).

3. Избегать сужений в продольном сечении поковки, стесняющих течение металла при штамповке навстречу пуансону (рис. 2.59, д).

4. Избегать конической формы хвостовиков (рис. 2.59, е).

5. Толщина стенок повок с глубокими сквозными или глухими отверстия-  
ми не должна быть меньше  $0,15 d$  (рис. 2.59, ж).

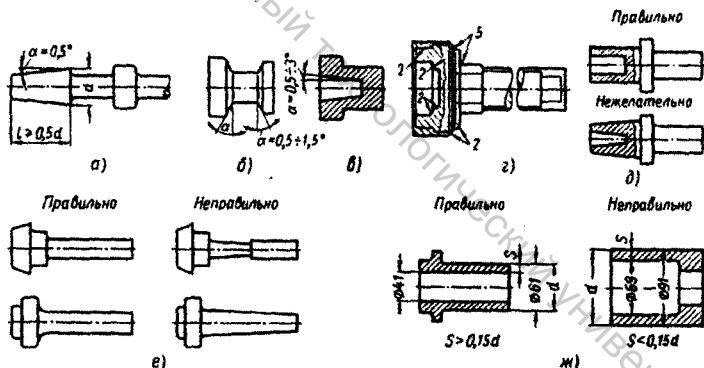


Рис. 2.59. Поковки, получаемые на ГКМ

## 2.19. Разработка технологического процесса штамповки

Особенность разработки технологического процесса штамповки повок состоит в том, что одновременно определяется конструкция соответствующей оснастки. Задачи технологической разработки, исходя из формы и размеров детали по чертежу, в общем сводятся к определению:

- объема, формы, размеров заготовки и поковки;

- способа штамповки;
- способа и производительности нагрева;
- количества переходов;
- типа, конструкции и размеров инструмента;
- типа отделочных операций;
- экономической эффективности принятого технологического решения.

Последовательность разработки технологического процесса и конструирования инструмента следующая. По укрупненным данным устанавливается целесообразный способ штамповки и выбирается тип штампа. Затем разрабатывается чертеж поковки и подбирается исходная заготовка; определяется термомеханический режим деформации металла.

В соответствии с принятым способом штамповки и типом штампа производится расчет переходов, определяются силовые параметры, подбирается оборудование и средства механизации и автоматизации. Затем разрабатываются рабочие чертежи конструкций штампов и приспособлений. В заключение определяют нормы времени и производительность процесса, после чего производят технико-экономический расчет.

### 3. ПРОИЗВОДСТВО ЗАГОТОВОК ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

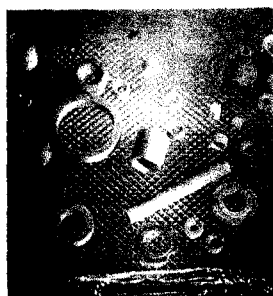
#### 3.1. Общие сведения о производстве изделий из порошков

Порошковая металлургия динамично развивалась во второй половине XX века благодаря тому, что она является безотходной (или почти безотходной) технологией производства деталей, которые не требуют последующей механической обработки или нуждаются в незначительном объеме. В большинстве промышленных стран 70 – 85% конечной продукции порошковой металлургии составляют детали для автомобилей. Потребителями продукции порошковой металлургии являются аэродинамическая техника, общее машиностроение, бытовая техника. Методами порошковой металлургии изготавливаются детали двигателей, подшипники, шестерни, фильтры, детали насосов, режущий инструмент, детали узлов трения и др. (рис. 3.1). Мировой объем продажи порошковых деталей вырос с 3,8 млрд. долларов в 1994 году до 5 млрд. долларов в 1998 г.; ожидается, что к 2004 г. он достигнет 6 млрд. долларов.

Технологическая схема производства изделий и полуфабрикатов методами порошковой металлургии состоит из следующих основных процессов: получение порошков с требуемыми свойствами; подготовка порошков к формованию; формование их различными методами в брикеты или заготовки определенных форм и размеров; спекание заготовок при определенной температуре; термическая и химико-термическая обработка, обработка давлением, пропитка и т.п.

Использование высококачественных порошков наряду с оптимальными технологиями их уплотнения позволило повысить плотность наиболее распространенных порошковых материалов на железной основе до  $7,4 \text{ г/см}^3$  (20 лет назад она составляла  $6,6 \text{ г/см}^3$ ), благодаря чему существенно расширилось их использование, и значительное количество литых деталей было заменено порошковыми.

Ожидается, что найдут достаточно широкое применение новые методы получения порошков с уникальными свойствами, такие, например, как разновидность процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), позволяющего производить никелевые порошки с дисперсными включениями частиц карбида. Материал, полученный из этих порошков, имеет повышенную стойкость к износу и коррозии в сочетании с исключительной трещиностойкостью.



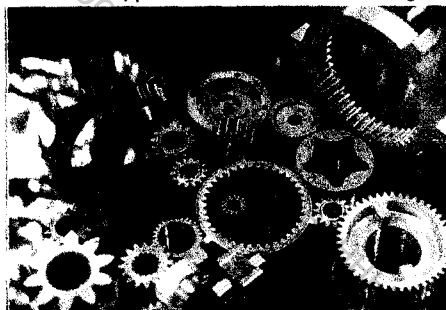
А



Б



В



Г



Д



Е



Ж



З



К

Рис. 3.1. Изделия из порошковых материалов:

а - оксидная керамика; б - магнито жесткие ферриты; в - заготовки коллектора электрических машин; г - конструкционные детали; д - магнитомягкие ферриты; е - детали стеклоформ; ж - алмазный инструмент; з - детали из порошковых композиционных материалов; к - фрикционные изделия

Большой практический интерес представляют распыленные порошки, которые содержат интерметаллиды, выделившиеся при затвердевании. Полученный из этих порошков листовой материал проявляет сверхпластичность без специальной термообработки. Относительное удлинение может достичь 300%. Такие материалы перспективны для использования в автомобилестроении.

Наряду с созданием новых порошков интенсивно разрабатываются новые перспективные технологии изготовления заготовок из них. Представляет практический интерес технология теплового прессования, которая позволяет за одну стадию уплотнения получать дешевые изделия из порошков с улучшенными ударными и усталостными свойствами; при этом технология отличается малыми потерями порошка и сравнительной дешевизной. Массовое производство заготовок с применением теплового прессования ожидается в ближайшем будущем.

Новый импульс для развития получила в последние годы технология инжекционного прессования. Этому способствовали разработки в области инжекционного формования термообрабатываемых сталей, благодаря которому удается получить материал, обладающий изотропной микроструктурой, высокой плотностью, усталостной и ударной прочностью. Эти разработки способствовали тому, что автомобилестроение постепенно становится главным потребителем заготовок деталей, изготавливаемых по данной технологии.

### **3.2. Свойства порошков**

*Химические свойства.* Химический состав порошка зависит от метода его производства, а также от степени чистоты исходных материалов. Содержание основного металла или сумма основных компонентов сплава в порошках, как правило, составляет не ниже 98-99%. Такая чистота исходных порошкообразных металлов для получения из них большинства изделий является удовлетворительной. Предельное содержание примесей в порошках определяется допустимым содержанием их в готовой продукции, за исключением оксидов, которые могут быть удалены при спекании. Наличие в порошках небольших количеств оксидов, легко восстанавливаемых водородом (оксиды железа, меди, никеля, вольфрама и др.), обеспечивает хорошую спекаемость таких порошков. Присутствие в порошках трудновосстановимых оксидов (хрома, марганца, кремния, титана, алюминия и др.) крайне нежелательно, так как затрудняет и прессование, и спекание, за исключением тех случаев, когда наличие указанных оксидов придает специальные свойства материалам.

Газовые пленки на поверхности частиц порошка образуются самопроизвольно, и порошок с размером частиц 10 мкм содержит около 0,05% по массе кислорода. Присутствие газа внутри частиц связано с методами их восстановления. Восстановленные порошки загрязнены газами-восстановителями и продуктами реакции, которые, не успев продиффундировать наружу, остаются внутри частиц либо в растворимом виде, либо в виде пузырей. Электролитические порошки содержат водород, выделяющийся на катоде совместно с осаждаемым металлом. В карбонильных порошках присутствует растворенный кислород, а в распыленных порошках – газы, механически захваченные внутрь частиц. Большие количества газов увеличивают хрупкость порошков. Поэтому целесообразна обработка порошков, особенно высокодисперсных, в вакууме, что обеспечивает эффективное газоотделение.

Важной химической особенностью порошков является их пирофорность, т.е. способность к самовозгоранию при соприкосновении с воздухом. Большинство порошков не являются пирофорными и в условиях изготовления не представляют опасности самовозгорания. Однако тонкие порошки железа, кобальта, алюминия, циркония и некоторых других весьма опасны, так как при соприкосновении с воздухом легко возгораются. Так, температура воспламенения частиц менее 50-70 мкм в слое взвешенной в воздухе пыли составляет соответственно 330-397 °C для титана, 420-450 °C для магния, 300-350 °C для восстановленного железа.

Взвешенные в воздухе частицы большинства металлов и сплавов могут вызывать взрыв при сравнительно невысоких значениях нижнего концентрированного предела взрываемости, составляющего 40 г/м<sup>3</sup> для циркония, 25 г/м<sup>3</sup> для титана, 10 г/м<sup>3</sup> для магния, 25 г/м<sup>3</sup> для алюминия.

Другой особенностью порошков является их токсичность, так как практически пыль любого из металлов, в том числе и совершенно безвредных в компактном состоянии, может воздействовать на человека и вызывать патологические изменения в организме. При этом предельно допустимые концентрации аэрозолей металлов и их соединений в окружающей атмосфере достаточно малы и составляют, например, 0,001 мг/м<sup>3</sup> для бериллия, 0,1 мг/м<sup>3</sup> для оксида ванадия, 2 мг/м<sup>3</sup> для алюминия, 6 мг/м<sup>3</sup> для вольфрама. В связи с этим при работе с металлическими порошками обязательно соблюдение специальных мер безопасности и личной гигиены.



Физические свойства. Форма частиц. Для описания формы частиц используют фактор неравномерности, представляющий собой отношение максимального ( $l_{\max}$ ) и минимального ( $l_{\min}$ ) размеров частиц ( $l_{\max}/l_{\min}$ ), а также фактор развитости поверхности – отношение квадрата периметра ( $P$ ) к площади ( $S$ ) ( $P^2/S$ ).

Форма частиц порошка оказывает определяющее влияние на его технологические свойства, а также на многие свойства порошковых материалов: плотность, проницаемость, прочность, однородность свойств и т.д.

Размер и гранулометрический состав. В зависимости от набора размеров частиц порошок характеризуется гранулометрическим (фракционным) составом. Фракция порошка – это диапазон размеров частиц между их максимальным и минимальным значениями. Гранулометрический состав порошка – содержание частиц определенных фракций в % по отношению к их общему количеству. В зависимости от размеров частиц порошки условно могут быть распределены на следующие группы: ультрадисперсные (размер частиц до 500 нм), ультратонкие (0,5 – 10 мкм), тонкие (10 – 40 мкм), средней крупности (40 – 250 мкм), грубые или крупные (250 – 1000 мкм).

Удельная поверхность представляет собой суммарную поверхность всех частиц, составляющих единицу массы или объема. Величина удельной поверхности зависит от размеров и формы частиц, степени их развитости и колеблется в пределах от 0,01 до 10-20 м<sup>2</sup>/г. Удельная поверхность является важнейшей характеристикой сыпучих материалов. С ней связан ряд свойств, таких как прессуемость, формуемость, спекаемость, коррозионная стойкость, содержание адсорбированных газов, окислов, вводимого пластификатора и т.д.

Пикнометрическая плотность – это действительная плотность частицы порошка, которая всегда несколько отличается от теоретической плотности вещества порошка. Изменение плотности объясняется наличием в частицах порошка примесей, закрытой пористости, дефектами кристаллической структуры и другими причинами.

Микротвердость частицы порошка характеризует ее способность к деформированию, что важно для оценки возможного поведения порошка при формовании. Она в значительной степени зависит от содержания в частицах порошка различных примесей и искаженности кристаллической решетки.

Технологические свойства. Насыпная плотность – это масса единицы объема при свободной насыпке порошка. Ее величина зависит от пикнометрической плотности частиц, а также от их формы, размеров, удельной поверхности. Для насыпной плотности полидисперсных порошков существует оптимум гранулометрического состава, при котором обеспечивается максимальная для данного материала насыпная плотность: мелкие частицы заполняют пустоты между крупными, а их суммарный объем приближается к объему этих пустот.

Плотность утряски – это масса единицы объема порошка после воздействия на порошок механических виброколебаний. В процессе виброколебаний частицы порошка, перераспределяясь относительно друг друга, расположатся более компактно, при этом происходит уменьшение объема. Плотность утряски по сравнению с насыпной плотностью может увеличиваться на 20-50%. Максимальная плотность утряски достигается для порошков со сферической формой частиц, особенно в случае использования сферических порошков различных фракций.

Текучесть – это способность порошка перемещаться под действием силы тяжести и оценивается временем истечения (сек) навески порошка массой 50 г через калиброванное отверстие диаметром 2,5 мм.

Текучесть порошка зависит от плотности материала, гранулометрического состава, формы и состояния поверхности частиц, степени окисленности и т.д. Текучесть порошка учитывается при определении производительности автоматических прессов, так как она определяет время заполнения порошком полости пресс-форм.

Уплотняемость – это способность порошков уменьшаться в объеме под воздействием давления или вибраций. Уплотняемость оценивается по плотности прессовок, изготовленных в цилиндрической пресс-форме при давлении прессования 200, 400, 500, 600, 700 и 800 МПа. Массу навески порошка определяют по формуле:

$$m = 0,79d^3 \rho_k, \quad (3.1)$$

где  $d$  – диаметр отверстия матрицы пресс-формы;  $\rho_k$  – плотность материала порошка.

Прессуемость порошка оценивается его способностью образовывать прессовку под воздействием определенного давления. Эта характеристика дает качественную оценку свойств порошка, комплексно связанную с уплотняемостью и формуемостью.

Формуемость порошка оценивает его способность сохранять приданную ему форму при прессовании в заданном интервале пористости. Эта характеристика определяется при прессовании навески порошка в пресс-форме скошенным пуансоном с последующим определением пористости, при котором прессовка не осыпается, и значения пористости, при котором прессовка не имеет расслоений.

### **3.3. Подготовка порошков к прессованию**

Отжиг порошков применяют с целью повышения их пластичности и прессуемости за счет восстановления остаточных оксидов и снятия наклепа. Нагрев осуществляют в защитной среде (восстановительной, инертной или вакууме) при температуре порядка 0,4—0,6 абсолютной температуры плавления металла порошка или наименее тугоплавкого компонента смеси порошков. Наиболее часто отжигу подвергают порошки, полученные механическим измельчением, электролизом и разложением карбониллов, которые по условиям их производства требуют существенной доработки. Применяемые для отжига проходные или другие печи идентичны используемым при восстановлении. С целью более тщательной очистки порошков от различных примесей часто отжиг проводят в атмосфере, содержащей какие-либо добавки. Например, отжиг порошка Fe в атмосфере  $H_2$  с добавкой HCl приводит к получению порошков, более чистых по содержанию Si, Mn из-за образования и испарения их хлоридов.

**Классификация** - это разделение порошков по величине частиц на фракции, используемые либо непосредственно для формования, либо для составления смеси, содержащей необходимое количество частиц каждого размера. Некоторые из получаемых фракций порошка могут оказаться непригодными для последующего применения и требуют какой-либо дополнительной обработки (укрупнения в случае мелких фракций или размола в случае крупных фракций). Наиболее распространена ситовая классификация порошков. Основным типом просеивающего устройства является механическое сито с электромагнитным или рычажным вибратором. Производительность таких сит достаточно высока (до нескольких сот килограммов порошка в час) и зависит от габаритных размеров сит и свойств порошка. Существенным недостатком является повышенная запыленность воздуха при просеве, в связи с чем обязательна герметизация таких сит. В отдельных случаях вибросита снабжают электромагнитными сепараторами, обеспечивающими очистку просеиваемого порошка от магнитных включений.

При затрудненности свободного просыпания порошка через ячейки сетки применяют протирочные сита, в которых специальное устройство с небольшим усилием давит на порошок, способствуя его продавливанию через сетку. Производительность протирочных сит значительно меньше обычных вибрационных.

Классификацию порошков по фракциям с размером частиц менее 40—50 мкм производят с помощью воздушных сепараторов, обеспечивающих выделение твердых частиц из газового потока под действием силы тяжести. В воздушно-проходном сепараторе порошок в потоке газа поступает в кольцевое пространство, в котором скорость воздушного потока снижается в несколько раз и крупные частицы под действием силы тяжести выпадают из него. Воздушный поток движется далее через тангенциально установленные лопатки, приобретая вращательное движение. Под действием центробежных сил более крупные частицы отбрасываются на стенки конического корпуса сепаратора, опускаются по ним и выводятся. Газовый поток с мелкими частицами поступает в циклон, где происходит их выделение.

Весьма эффективными аппаратами для разделения порошка являются циклоны-сепараторы, конструкция которых проста, а производительность велика. В корпус циклона по касательной к окружности нагнетают содержащий твердые частицы газовый поток, который приобретает вращательное движение. На каждую твердую частицу действуют сила тяжести, увлекающая ее вниз; центробежная сила, выталкивающая частицу в радиальном направлении; сила давления потока, заставляющая частицу двигаться по окружности. В итоге частицы движутся по спирали, а, достигнув стенки корпуса циклона, перемещаются по конусу к выходному отверстию. Мелкие частицы выносятся газом из циклона и могут быть выделены в следующем циклоне. Работу воздушных сепараторов регулируют изменением скорости потока газа, проходящего через них.

*Смешивание* - это приготовление однородной механической смеси из металлических порошков различного химического и гранулометрического состава или смеси металлических порошков с неметаллическими. Это одна из важных технологических операций процесса изготовления порошковых изделий. Для взвешивания смешиваемых компонентов используют торговые или технические весы. Приготовление смеси заданного состава проводят в специальных смесительных устройствах. Важной задачей смешивания является обеспечение однородности смеси, так как от этого во многом зависят конечные свойства изделий.

Смесь считается однородной в том случае, если не менее 95 % произвольно взятых проб имеют химический и гранулометрический составы, отвечающие заданному.

Наиболее распространенным является механическое смешивание компонентов в шаровых мельницах и смесителях. Лучшие результаты достигаются при соотношении смеси и размольных тел (шаров) по массе 1 : 1. Одновременно смешивание сопровождается измельчением компонентов. В тех случаях, когда измельчение нежелательно, используют смесители различных типов: барабанные, шнековые, лопастные, центробежные, планетарные, конусные и установки непрерывного действия.

В общем случае равномерное распределение частиц порошков в объеме смеси достигается тем легче и быстрее, чем ближе плотности смешиваемых компонентов. При большой разнице плотностей имеет место расслоение компонентов. В этом случае полезно применить раздельную загрузку компонентов отдельными порциями: сначала более легкие с частью какого-либо более тяжелого, а затем всю оставшуюся массу компонентов. Смешивание лучше проводить в жидкой среде (спирте, бензине, глицерине), что, однако, не всегда экономически целесообразно из-за усложнения технологического процесса.

### **3.4. Прессование порошков в закрытой пресс-форме**

#### *Закономерности уплотнения порошков в закрытой пресс-форме*

Прессование в закрытой пресс-форме выполняют по одно- или двусторонней схеме. Прессование по односторонней схеме (рис. 3.2, а) осуществляется подвижным верхним пуансоном; прессование по двусторонней схеме (рис. 3.2, б) осуществляется двумя подвижными пуансонами: верхним и нижним.

В процессе заполнения полости пресс-формы порошком контакт между частицами происходит только в определенных точках. В связи с этим действительные величины контактных давлений в силу малости величины начальных поверхностей соприкосновения (0,001-0,01% от общей поверхности контактирующих частиц) достигают таких значений, при которых возникают пластические деформации либо местные разрушения, т.е. напряженное состояние частицы в окрестностях зоны контакта близко к предельному. Так, при среднем напряжении по объему порошка 0,1 МПа наибольшее контактное давление может достигать

2000 МПа, и первоначальный точечный контакт переходит в контакт по некоторой очень малой поверхности конечной величины.

Сущность процесса прессования порошка заключается в уменьшении начального объема сжатием, тогда как при деформировании компактного материала объем остается постоянным, а изменяются только геометрические размеры. Объем порошкового тела при прессовании изменяется в результате заполнения пустот между частицами за счет их смещения

и пластической деформации частиц. Для пластичных металлов деформация частиц вначале процесса ограничена приконтактными участками, что приводит к возникновению вблизи них огромных напряжений, а затем распространяется вглубь частицы. В случае хрупкого материала деформация проявляется в разрушении и дроблении выступов на поверхности частиц.

Если подвергнуть прессованию засыпанные в цилиндрическую пресс-форму одинаковые по массе и высоте слои порошка, разделенные прокладками из тонкой фольги, то после уплотнения отдельные слои будут отличаться один от другого по толщине и форме (рис. 3.3). В вертикальном направлении слои порошка различаются по толщине: наименьшую толщину (т.е. наибольшую плотность) имеет верхний слой, непосредственно соприкасающийся с пуансоном, к которому прилагается давление, и наибольшую – нижний, находящийся у дна пресс-формы. В горизонтальном направлении плотность слоев также различна: в верхнем слое она максимальна у стенок пресс-формы и падает по направлению к центру, а в нижнем слое наиболее плотной является центральная часть. Более подробно распределение давления и плотности по объему цилиндрического образца представлено на рис. 3.4.

Неоднородное распределение плотности по объему брикета обусловлено затратой усилия прессования на преодоление внешнего трения порошка о контактирующие с ним поверхности элементов пресс-формы (стенка внутренней полос-

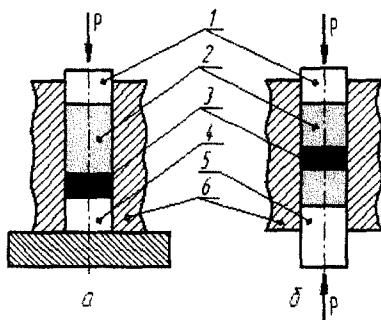


Рис. 3.2. Схемы одно- (а) и двустороннего (б) прессования порошков: 1 – подвижный верхний пуансон; 2 – порошок; 3 – спрессованная заготовка; 4 – неподвижный пуансон; 5 – подвижный нижний пуансон; 6 – матрица

ти матрицы и торцовые поверхности верхнего и нижнего пуансонов). Межчастичное трение, влияя на величину достигаемой при уплотнении плотности, принципиально не может вызвать и, естественно, не вызывает появления градиента плотности по высоте и сечению брикета.

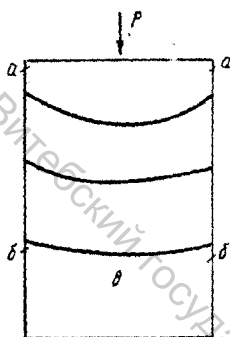


Рис. 3.3. Расположение слоев с различной плотностью в цилиндрическом образце

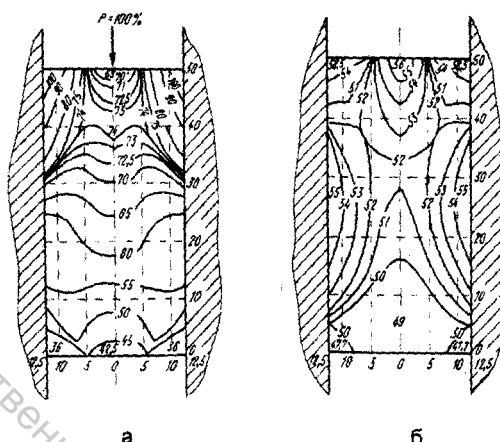


Рис. 3.4 Изменение давления (а) и плотности (б) по объему цилиндрического образца

Одна из причин образования в средней части брикета зоны большего уплотнения связана с формой и направлением распространения очага деформации при приложении давления к порошку. Другая причина такого повышения плотности — выдавливание порошка из углов полости матрицы в направлении результирующей сил трения порошка о стенки матрицы и торцовую поверхность пуансона.

На рис. 3.5 показано изменение плотности по высоте брикета при одно- и двустороннем (когда давление к брикету прикладывается одновременно сверху и снизу) прессовании порошка меди. При двустороннем прессовании более плотными оказываются верхняя и нижняя части брикета, тогда как в середине сохраняется зона пониженной плотности, называемая нейтральной.

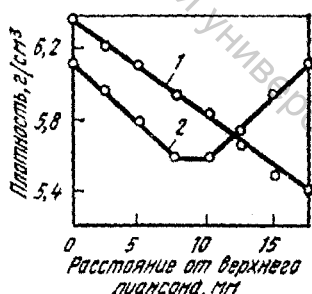


Рис. 3.5. Изменение плотности по высоте брикета:  
1 — одностороннее прессование;  
2 — двустороннее прессование

Один из лучших способов уменьшить внешнее трение, а в результате повысить плотность и обеспечить более равномерное распределение ее по объему прессовки — применить смазку. Наиболее существенное влияние на процесс прессования оказывают активные смазки, изменяющие физические и механические свойства частиц. Например, поверхностно активные смазки понижают прочность тонких наружных слоев частиц, что облегчает их деформирование и способствует уплотнению. Наряду с активными существуют и инертные смазки, не оказывающие какого-либо воздействия на свойства материала порошка, но понижающие коэффициент внешнего трения. В качестве смазок используют стеариновую кислоту и ее соли (стеараты цинка, свинца и др.), парафин, дисульфид молибдена, технические масла, олеиновую кислоту, поливиниловый спирт, глицерин, камфору и т. д. Часто смазку применяют в виде раствора в ацетоне, бензине, бензоле, четыреххлористом углероде и других легколетучих органических средах. В этом случае требуется операция удаления растворителя из прессовки, что несколько усложняет и удорожает технологический процесс. Можно вводить смазку в прессуемый порошок, смазывать ею стенки матрицы или прибегнуть к комбинированному применению этих двух способов. Первый способ весьма прост, и для его осуществления достаточно имеющегося смесительного оборудования, тогда как второй способ требует больших затрат ручного труда из-за технических трудностей механизации процесса смазки стенок матрицы.

*Боковое давление.* Перемещение частиц в процессе прессования приводит к возникновению давления на стенки матрицы пресс-формы, которое называют боковым. Количественным критерием бокового давления является коэффициент бокового давления:

$$\xi = P_r / P, \quad (3.2)$$

где  $P$  — давление прессования (вертикальное);  $P_r$  — давление на стенки пресс-формы (горизонтальное).

Величина  $\xi$  обычно составляет 0,2 – 0,8, причем, чем пластичнее материал, тем выше коэффициент бокового давления (например, для вольфрама – 0,2, для железа – 0,39, для олова – 0,49, для меди – 0,54, для серебра – 0,72, для свинца – 0,79).

*Давление выталкивания.* Наличие внешнего трения прессуемого порошка о стенки пресс-формы определяет усилие, необходимое для выталкивания брикета после его спрессовывания и называемое *давлением выталкивания*. Весьма



важно знать величину давления выталкивания для решения практических вопросов прессования порошков, в частности для правильного расчета и конструирования пресс-инструмента. Давление выталкивания пропорционально давлению прессования и зависит от коэффициента внешнего трения и коэффициента Пуассона прессуемого порошка. Обычно давление выталкивания принимают равным 0,2—0,35 от давления прессования, и оно возрастает с увеличением высоты брикета.

*Упругое последствие.* Явление увеличения размера прессовки при снятии давления прессования, а также при выталкивании брикета из формирующей полости пресс-формы называют *упругим последствием*. В связи с этим целесообразно в процессе прессования выдерживать сформованную заготовку под нагрузкой в течение от нескольких секунд до 2 — 3 мин, что приводит к возрастанию и стабилизации плотности брикета.

Основная часть упругого расширения брикета при выталкивании протекает почти мгновенно (в момент выталкивания брикета из матрицы), а оставшая часть требует определенного времени, вплоть до нескольких дней. По этой причине при изготовлении изделий точных размеров срок хранения прессовок перед спеканием не должен превышать нескольких часов.

Величина упругого последствия зависит от характеристик прессуемого порошка (дисперсности, формы и состояния поверхности частиц, содержания оксидов, механических свойств материала); давления прессования; наличия и количества смазки; упругих свойств элементов пресс-формы, других факторов. Относительное изменение линейных размеров изделий вследствие упругого последствия определяется из выражения

$$\delta_l = (\Delta l / l) 100 = [(l_1 - l_0) / l_0] 100\%, \quad (3.3)$$

где  $\delta_l$  — величина упругого последствия;  $\Delta l$  — абсолютное расширение брикета по длине или диаметру;  $l_0$  — длина (диаметр) брикета, находящегося в пресс-форме под действием давления прессования;  $l_1$  — длина (диаметр) брикета после снятия давления прессования или выталкивания из пресс-формы.

Объемная величина упругого последствия определяется по аналогичной зависимости:

$$\delta_v = (\Delta V / V) 100 = [(V_1 - V_0) / V_0] 100\%. \quad (3.4)$$

Эффект упругого последействия по высоте брикета больше, чем в поперечном направлении, и составляет до 5—6 % (по сравнению с 1—3 %). Это связано с большей величиной осевого усилия прессования по сравнению с боковым давлением, а также с большей осевой по сравнению с поперечной упругой деформацией матрицы пресс-формы. Кроме того, потеря давления прессования, вследствие трения порошка о стенки пресс-формы, приводит к неравноплотности брикета, что также влияет на изменение величины упругого последействия по высоте.

Упругое последействие частично снимает напряжения на контактных участках, что приводит к уменьшению суммарной площади контактов. Разрыв контактов между частицами на большом протяжении может вызвать нарушение целостности прессовок, называемое *расслоем*, в том числе появление трещин, а иногда и разрушение брикета.

Упругое последействие брикетов из порошков хрупких и твердых материалов больше, чем брикетов из мягких и пластичных металлических порошков, так как при одном и том же давлении прессования прочность прессовки из более твердых материалов меньше и возрастает роль упругой деформации по сравнению с пластической.

Применение смазок позволяет уменьшить величину упругого последействия, особенно в случае использования поверхностно-активных смазок.

*Прочность прессовок* определяется как механическим зацеплением и переплетением поверхностных выступов и неровностей частиц порошка, так и действием межатомных сил сцепления, степень проявления которых возрастает с увеличением контактной площади. В зависимости от природы порошка, его физических и химических свойств действие тех или иных сил будет проявляться в большей или меньшей степени. Известно, что прочность компактных литых металлов данного состава растет с увеличением твердости, т. е. вольфрам прочнее железа, железо прочнее меди, а медь прочнее олова. Для порошковых прессовок наблюдается противоположная зависимость. Прочность возрастает не с увеличением твердости, а с ее уменьшением и ростом пластичности металла. Так, прессовки из олова прочнее, чем прессовки из меди; из меди прочнее, чем из железа, а из железа прочнее, чем из вольфрама.

### 3.5. Практика прессования порошков в жестких закрытых пресс-формах

Свойства заготовок, получаемых прессованием порошков, в большой мере зависят от вида и способов проведения этой операции. На рис. 3.6 представлены известные принципиальные решения для случая двустороннего прессования в пресс-формах. Этот метод предпочтительнее одностороннего прессования, так как обеспечивает более благоприятное распределение материала и более высокую его плотность. Кроме того, возможность быстрого освобождения пресс-форм без их разборки также является достоинством двустороннего прессования. Реализация двустороннего прессования при неподвижной матрице (рис. 3.6, а) предусматривает заполнение пресс-формы порошком на высоту  $H$ , а последующее одновременное встречное перемещение нижнего и верхнего пуансонов приводит к уплотнению порошка до высоты  $h$ . После прессования верхний пуансон поднимают и одновременно перемещают вверх нижний пуансон, выталкивая заготовку из пресс-формы.

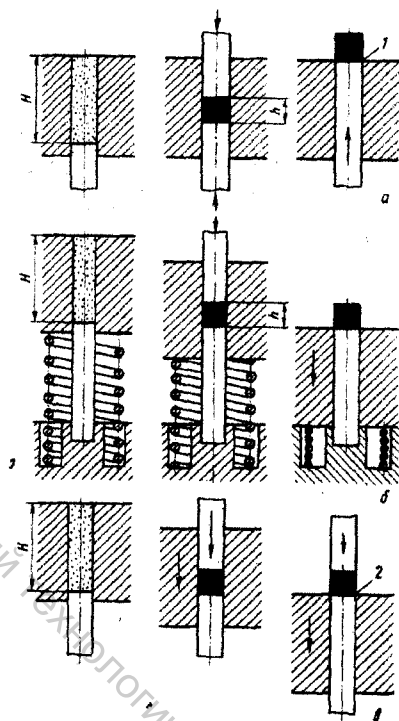


Рис. 3.6. Принципиальные схемы некоторых вариантов двустороннего прессования:

- а — матрица неподвижна, пуансоны перемещаются;
- б — матрица на пружинах, нижний пуансон неподвижен;
- в — движение матрицы регулируется, нижний пуансон неподвижен. Заготовка освобождается выталкивателем 1 или отводом матрицы 2

Чаще применяют прессование с подвижной матрицей (рис. 3.6, б). Нижний пуансон при этом неподвижен, а верхний перемещается вместе с матрицей вниз. Возникающие при этом силы трения между пуансоном и матрицей смещают ее вниз до тех пор, пока не уравнивается силой сжатия пружин.

При повышенной скорости прессования и точном регулировании перемещений пуансона и матрицы, что важно и необходимо при изготовлении деталей сложной формы, матрица должна иметь независимый механический привод (рис. 3.6, в). После окончания прессования давление на пуансон снижают, а матрицу отводят вниз; затем поднимают верхний пуансон, и спрессованная заготовка полностью освобождается. В отличие от метода выталкивания здесь значительно менее опасно появление трещин из-за снятия упругих напряжений.

Горячая штамповка порошковых заготовок является одним из эффективных методов получения беспористого или малопористого изделия. Она сочетает преимущества порошковой металлургии и штамповки. При целесообразной форме заготовки и точном соблюдении массы снижаются потери на облой; детали получаются с малыми допусками, и, соответственно, не только уменьшаются отходы, но и сокращается по сравнению со штамповкой расход энергии (табл. 3.1).

Процесс горячей штамповки (рис. 3.7) осуществляется следующим образом. Первоначально прессуется строго дозированная по массе порошковая заготовка относительной плотностью около 70%. Затем эта заготовка нагревается в защитной атмосфере до температуры штамповки и далее подвергается непосредственно штамповке. Для закаливаемой стали стремятся совместить операцию штамповки с охлаждением после штамповки.

Таблица 3.1.

Расход материалов и энергии

| Обработка                                | Расход материалов | Расход энергии |
|------------------------------------------|-------------------|----------------|
| Штамповка в открытых штампах             | 1                 | 1              |
| Ковка в штампах                          | 1                 | 1              |
| Безоблойная штамповка                    | 0,73              | 0,78           |
| Отливка и штамповка с минимальным облоем | 0,70              | 0,44           |
| Штамповка порошков                       | 0,38              | 0,41           |

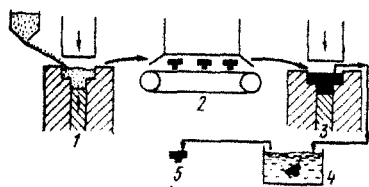


Рис. 3.7. Схема процесса горячей штамповки порошковых материалов:

- 1 – прессование порошка; 2 – предварительный нагрев заготовки в защитной атмосфере; 3 – горячее уплотнение (штамповка); 4 – закалка; 5 – готовая деталь

Горячая штамповка производится на воздухе, в защитных средах и в вакууме. Применяют при изготовлении изделий из углеродистых, легированных порошковых сталей, материалов специального назначения. При штамповке формирование изделия совмещается с формированием его структуры, технологические параметры процесса сказываются на свойствах материала. На свойства изделий большое влияние имеет последующая их термообработка, в частности, отжиг.

Горячую штамповку применяют для получения беспористых композиционных антифрикционных материалов с повышенной несущей способностью. Прочность несущего каркаса повышается вследствие его термомеханической обработки. Кроме того, горячая штамповка существенно уменьшает распад твердых смазок, обладающих недостаточной термостойкостью, и позволяет регулировать в широких пределах степень гомогенизации металлического каркаса. При обработке методом горячей штамповки пористых заготовок ( $\Pi = 25-30\%$ ) путем нагрева в среде водорода при  $750 - 1100^\circ\text{C}$  в течение  $3 - 120$  мин и последующей деформации получают пористость меньше или равную  $1\%$ .

*Калибрование и допрессовывание спеченных заготовок.* Калибрование спеченных заготовок выполняют для обеспечения требуемой точности размеров и величины допусков на отклонения формы и взаимного расположения поверхностей изделия. Допрессовывание выполняют в основном для увеличения плотности спеченных заготовок.

Калибрование осуществляют на автоматических калибровочных прессах по схеме, представленной на рис. 3.8. Исходное положение движущихся частей инструмента перед началом калибрования (рис. 3.8, а): игла 1, пуансон 2 и выталкиватель 4 находятся в верхнем положении; матрица 3 в продолжение всего цикла неподвижна; калибруемая заготовка установлена на выталкиватель установочным органом робота (манипулятора).

После отвода установочного органа из рабочей зоны пресса выталкиватель 4 опускается в нижнее положение (рис. 3.8, б).

Ползун пресса опускается вниз; отверстие втулки прошивается иглой, которая входит в него с гарантированным зазором, исключающим калибрование внутреннего диаметра и появление разрывающих втулку усилий. Верхний пуансон упирается в торец втулки и вводит ее в матрицу. Производится одновременно калибрование по наружному и внутреннему диаметрам.

В конце хода втулка опирается на выталкиватель и калибруется по высоте (рис. 3.8, в). Извлечение втулки производят выталкивателем; движение вверх выталкивателя и верхнего пуансона происходит с одинаковой скоростью; игла при выталкивании относительно втулки не перемещается. После выхода втулки из матрицы (рис. 3.8, г) производится ускоренный отвод верхнего ползуна с иглой вверх; верхний пуансон остается на месте, облегчая вывод иглы из втулки. При величине допуска 0,005 – 0,007 мм втулки калибруют вторично после запрессовки в сопрягаемую деталь.

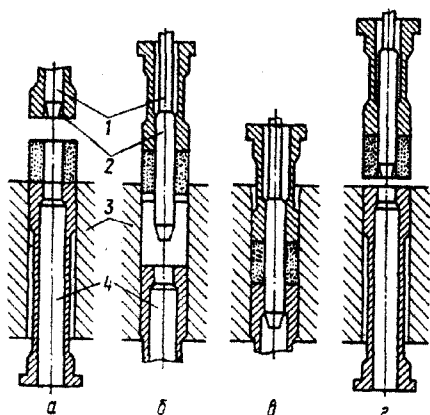


Рис. 3.8. Схема калибрования заготовок типа гладких втулок:

а – исходное положение; б – начало процесса калибрования; в – окончание процесса калибрования; г – выталкивание изделия; 1 – игла; 2 – пуансон; 3 – матрица; 4 – выталкиватель

### 3.6. Расчет и конструирование формообразующего инструмента

*Расчет технологических параметров оборудования.*

Основными технологическими параметрами, которые необходимо рассчитать, являются, усилие пресса  $P$ ; усилие выталкивания  $P_{\text{выт}}$ ; ход верхнего пуансона  $H_{\text{вп}}$ ; расстояние между столом пресса в нижнем положении и ползуном в верхнем положении  $H_p$ ; ход выталкивателя пресса  $H_{\text{выт}}$ .

Усилие пресса  $P$  выбирают на основании усилия прессования  $P_{\text{пр}}$  изделия:

$$P_{\text{пр}} = pS, \quad (3.5)$$

где  $p$  – давление прессования;  $S$  – площадь проекции детали на горизонтальную плоскость.

Усилие выталкивания равно

$$P_{\text{выт}} = kP_{\text{пр}}, \quad (3.6)$$

где  $k = 1,25 - 1,3$  – коэффициент запаса.

Ход верхнего пуансона  $H_{вп}$  (рис. 3.9) складывается из расстояния  $h_1$  от нижнего торца верхнего пуансона до верхнего торца матрицы и величины осевого сжатия порошка  $h_2$ :

$$H_{вп} = h_1 + h_2. \quad (3.7)$$

Расстояние  $h_1$  зависит от принятого метода засыпки шихты в формующую полость пресс-формы. Для стационарных пресс-форм при массовой объемной дозировке, производимой вне пресса, это расстояние должно обеспечивать возможность удобной засыпки порции шихты в полость матрицы. В этом случае величина  $h_1$  зависит от устройства, предназначенного для транспортировки шихты от места дозировки до формующей полости. Обычно эта величина составляет не менее 40 мм.

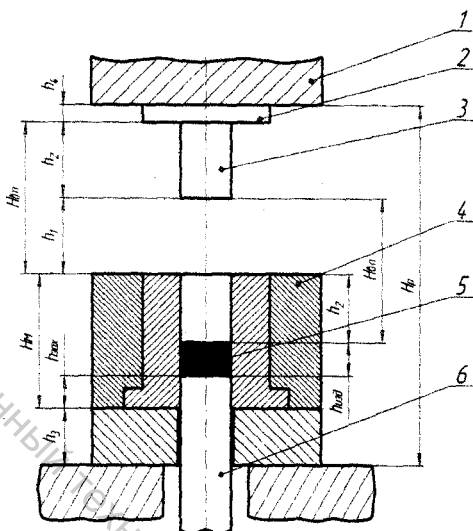


Рис. 3.9. Схема для расчета технологических параметров прессового оборудования: 1 - ползун; 2 - плита; 3 - пуансон; 4 - пресс-форма; 5 - прессовка; 6 - выталкиватель

Величина осевого сжатия порошка равна

$$h_2 = h_{изд} \left( \frac{\rho_{пл}}{\rho_{п}} - 1 \right), \quad \text{где} \quad (3.8)$$

$h_{изд}$  - высота изделия;  $\rho_{пл}$ ,  $\rho_{п}$  - соответственно плотность прессовки и насыпная плотность порошка.

Необходимое для установки пресс-формы расстояние  $H_p$  определяется как сумма

$$H_p = H_{м} + H_{вп} + h_3 + h_4, \quad (3.9)$$

где  $H_{м}$  - высота матрицы;  $h_3$  и  $h_4$  - толщина плит верхнего пуансона и матрицы.

Высота изделия связана с ходом выталкивателя пресса  $H_{\text{выт}}$  следующей зависимостью:

$$H_{\text{выт}} \geq \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н min}}} h_{\text{изд}}, \text{ где} \quad (3.10)$$

$\rho_{\text{н min}}$  – минимальная насыпная плотность порошка.

*Расчет геометрических параметров пресс-форм и порошковых изделий*

Для выполнения расчета и конструирования пресс-формы необходимо знать:

- 1) технологические характеристики шихты: насыпную плотность шихты  $\rho_{\text{н}}$ , г/см<sup>3</sup>; уплотняемость, формуемость, текучесть;
- 2) технологические характеристики прессовки: плотность прессовки  $\rho_{\text{п}}$ , г/см<sup>3</sup>; упругие последствия по линейным размерам при прессовании (калибровании) в процентах  $a_{\text{л}}$ ,  $a_{\text{к}}$ , или в абсолютной величине  $l_{\text{п}}$ ,  $l_{\text{к}}$ ; усадку при спекании (рост) по линейным размерам в процентах  $\beta$  или в абсолютной величине  $\varepsilon$ ; уменьшение массы прессовки при спекании за счет выгорания смазки, восстановление оксидов и других факторов в процентах  $\xi$ ; прирост плотности при калибровании (или допрессовывании) прессовки в процентах  $\tau$ ; величину припуска под калибрование или механическую обработку спеченной заготовки  $P_{\text{к}}$ .

При проектировании пресс-форм для холодного прессования изделий из металлических порошков или из шихт на их основе необходимо обеспечить получение прессовок заданной формы, размеров, плотности и равномерного ее распределения по сечению. Для обеспечения равномерной плотности по сечению изделия необходимо применять составные пуансоны с независимо перемещающимися элементами или проводить формование выступающих элементов изделия на неподвижных деталях пресс-формы.

Условие достижения равномерной плотности в данном сечении изделия

$$\frac{H}{h} = \frac{H_1}{h_1} = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}}, \quad (3.11)$$

где  $H$ ,  $H_1$  – высота слоя порошка в пресс-форме в соответствующих сечениях;  $h$ ,  $h_1$  – высота прессовки в этих же сечениях.

Объем прессовки определяется по формуле

$$V_{\text{п}} = V_{\text{д}} (1 + \xi / 100), \quad (3.12)$$

где  $V_{\text{д}}$  – объем спеченной заготовки (детали).



Масса прессовки определяется по формуле

$$G_{\Pi} = \rho_{\Pi} V_{\Pi}. \quad (3.13)$$

Масса навески порошковой шихты определяется по формуле

$$G_H = (1,02 \div 1,05) G_{\Pi}, \quad (3.14)$$

где коэффициент 1,02—1,05 учитывает потери массы при засыпке шихты в матрицу и прессовании.

Высота прессовки зависит от номинального размера готовой детали  $H$  и его изменения в результате упругих последствий, роста или усадки при спекании и припуска на дополнительную обработку

$$H_{\Pi} = H - I_H \pm \varepsilon + \Pi_K. \quad (3.15)$$

При прессовании деталей, имеющих переходы по высоте, необходимо определять высоту каждого участка прессовки.

Высота загрузочной камеры, т. е. высота части формирующей камеры, заполняемой порошком  $H_3$  (рис. 3.10), определяется по формуле

$$H_3 = k H_{\Pi}, \quad (3.16)$$

где  $k$  — коэффициент уплотнения.

Величина  $k$  определяется по формуле

$$k = \rho_{\Pi} / \rho_H. \quad (3.17)$$

Общая высота матрицы  $H_M$  определяется с учетом высоты загрузочной камеры и величин захода в матрицу верхнего  $h_B$  и нижнего  $h_H$  пуансонов (рис. 3.10)

$$H_M = H_3 + h_B + h_H. \quad (3.18)$$

Размеры рабочей полости матрицы зависят от наружных размеров изделия, а также их изменения после прессования, спекания и калибрования и допускаемой величины износа.

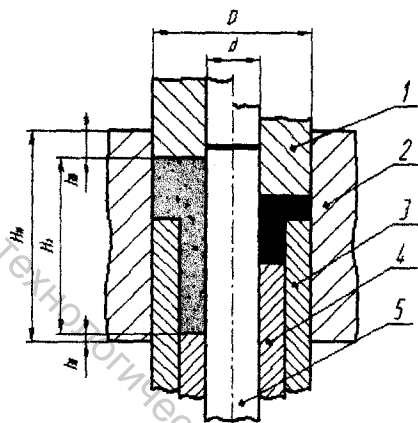


Рис. 3.10. Схема для расчета геометрических параметров пресс-формы: 1 — верхний пуансон; 2 — матрица; 3, 4 — соответственно наружная и внутренняя втулки нижнего пуансона; 5 — стержень

В общем виде минимальный начальный размер рабочей полости матрицы ( $D_m$ ) определяется по формуле

$$D_{mmin} = D_{min} - l_{\Pi} \pm \varepsilon \pm \Pi_k, \quad (3.19)$$

где  $D_{min}$  — минимально допустимый размер готовой детали, мм.

Максимально допустимый (конечный) размер рабочей полости матрицы

$$D_{mmax} = D_{max} - l_{\Pi} \pm \varepsilon \pm \Pi_k, \quad (3.20)$$

где  $D_{max}$  — максимально допустимый размер готовой детали, мм.

Припуск на износ матрицы определяется по формуле

$$\Delta D = D_{mmax} - D_{mmin} - A_m, \quad (3.21)$$

где  $A_m$  — действительный допуск начального размера рабочей полости матрицы при ее изготовлении.

Размеры формирующих полостей матрицы для изделий, подвергающихся калиброванию, целесообразно определять в следующей последовательности.

Минимальный размер рабочей полости калибрующей матрицы

$$D_{kmin} = D_{min} - l_k. \quad (3.22)$$

Максимально допустимый размер рабочей полости калибрующей матрицы

$$D_{kmax} = D_{max} - l_k. \quad (3.23)$$

Размеры деталей после спекания

$$D_{сп} = D_{min} \pm \Pi_k. \quad (3.24)$$

Знак «плюс» ставится при калибровке с положительным припуском, «минус» — с отрицательным.

Размеры детали после прессования

$$D_{пр} = D_{сп} \pm \varepsilon. \quad (3.25)$$

Знак «плюс» ставится при усадке в процессе спекания, «минус» — при росте.

Размеры рабочей полости матрицы для холодного прессования

$$D_m = D_{пр} - l_{\Pi}. \quad (3.26)$$

Размеры стержня зависят от внутренних размеров детали, изменения их после технологических операций и принимаются максимально возможными, т. е. рассчитываются с учетом верхнего предела допуска на размер детали, чтобы обеспечить наибольший припуск на износ стержня.

Максимально допустимый размер рабочей части стержня

$$d_{стmax} = d_{max} - I_{\Pi} \pm \varepsilon \pm \Pi_{\kappa} \pm I_{\kappa}, \quad (3.27)$$

где  $d_{max}$  — максимально допустимый размер отверстия детали.

Минимально допустимый размер стержня

$$d_{стmin} = d_{min} - I_{\Pi} \pm \varepsilon \pm \Pi_{\kappa} \pm I_{\kappa}, \quad (3.28)$$

где  $d_{min}$  — минимально допустимый размер отверстия детали.

Если деталь с отверстием подвергается калиброванию, то определение размеров стержня проводится в следующей последовательности. Определяется диаметр стержня при калибровании

$$d_{\kappa} = d_{max} \pm I_{\kappa}. \quad (3.29)$$

Знак «плюс» ставится в случае уменьшения отверстия в результате упругих последствий, «минус» — при увеличении.

Размер отверстия после спекания

$$d_{сп} = d_{\kappa} \pm \Pi_{\kappa}. \quad (3.30)$$

Знак «плюс» ставится при калибровании с отрицательным припуском, «минус» — с положительным.

Размер отверстия после прессования

$$d_{пр} = d_{сп} \pm \varepsilon. \quad (3.31)$$

Знак «плюс» ставится в случае уменьшения размера при спекании, «минус» — в случае увеличения.

Размер рабочей части стержня

$$d_{ст.р} = d_{пр} \pm I_{\Pi}. \quad (3.32)$$

Знак «плюс» ставится в случае уменьшения отверстия в результате упругих последствий, «минус» — при увеличении.

### 3.7. Проектирование и изготовление пресс-форм

Проектирование рабочих чертежей пресс-формы и ее деталей требует: выбора допусков и посадок в сопряжениях деталей; назначения допусков на отклонение взаимного расположения и геометрической формы деталей пресс-форм и элементов поверхности этих деталей; выбора шероховатости поверхности деталей пресс-форм и режимов их термообработки.

На рис. 3.11. приведена конструктивная схема пресс-формы, на примере которой рассматриваются некоторые вопросы рабочего проектирования.

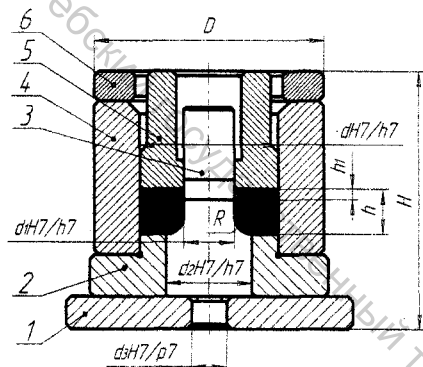


Рис. 3.11. Конструктивная схема пресс-формы:

1 — подкладка; 2 — кольцо промежуточное; 3 — сердечник; 4 — матрица; 5 — пуансон; 6 — ограничитель

В зависимости от выполняемых функций поверхности деталей пресс-форм разделяют на формообразующие; сопрягаемые подвижные; сопрягаемые неподвижные, в том числе опорные, свободные. Одним из наиболее ответственных моментов рабочего проектирования является выбор допусков на размеры сопрягаемых подвижных деталей. Этим выбором определяется величина зазора, оказывающая решающее влияние на долговечность пресс-формы и качество получаемых изделий.

Существуют два подхода к выбору допусков. В первом случае пресс-форму рассматривают как обычный объект машиностроительного производства. Величина зазора в подвижных сопряжениях определяется качеством точности изготовления сопрягаемых деталей, величиной их номинальных размеров, видом посадки и не зависит от дисперсности прессуемого порошка. В этом случае процесс изготовления пресс-формы может быть полностью унифицирован с точки зрения последовательности технологических операций, использования универсального металлорежущего и мерительного инструмента.

Во втором случае основным критерием для выбора зазора является требование в максимальной степени исключить возможность попадания в зазор частиц порошка. Величина зазора определяется крупностью самой мелкой фракции прессуемого порошка и в большинстве случаев выбирается равной 5—15 мкм не-

зависимо от номинальных размеров сопрягаемых деталей. Пресс-формы изготавливают по индивидуальному технологическому процессу с использованием специального оборудования, инструмента, приспособлений. Эксплуатация пресс-форм с уменьшенными зазорами требует поддержания высокой точности прессового оборудования и высокой культуры производства.

При назначении допусков на отклонения геометрической формы и взаимного расположения элементов поверхности исходят из следующих норм: отклонение от плоскостности верхней торцевой поверхности матрицы  $\leq 0,01/100$  мм; отклонение от перпендикулярности образующей внутренней поверхности матрицы к верхней торцевой поверхности  $\leq 0,02/100$  мм; отклонение от параллельности опорных поверхностей верхнего и нижнего пуансонов и стержня относительно верхней торцевой поверхности матрицы  $\leq 0,01/100$  мм; отклонение от параллельности хода прессующего пуансона, стержня и выталкивателя относительно внутренней поверхности матрицы  $\leq 0,02/100$  мм; отклонение от перпендикулярности направляющих поверхностей колонок относительно верхней торцевой поверхности матрицы  $\leq 0,02/100$  мм; отклонение от параллельности плоскостей прилегания опорных плит, подставок и др.  $\leq 0,01/100$  мм; эксцентриситет, конусность, овальность в пределах допуска на диаметр.

Типовые требования к шероховатости поверхности деталей пресс-форм представлены на рис. 3.12. В условиях устойчивой номенклатуры порошковых изделий используют принцип нормализации деталей пресс-форм, который является базой автоматизации технологической подготовки производства.

При проектировании разрезных матриц необходимо выбрать количество разрезов и их расположение, руководствуясь следующими принципами:

- линии разреза должны быть проведены так, чтобы обеспечить свободную разборку секций разрезной матрицы для извлечения детали, которая может заклиниваться в результате действия сил упругого последействия (рис. 3.13, а, б);
- линии разреза в матрицах, из которых извлечение детали производится выталкиванием, должны быть расположены так, чтобы предотвратить образование рисок на боковых поверхностях детали (рис. 3.13, б);
- следует избегать в сечении одной секции параллельных линий, что обеспечит возможность восстановления размеров износившейся матрицы с помощью перешлифовки плоскостей разреза (рис. 3.13, б, в);

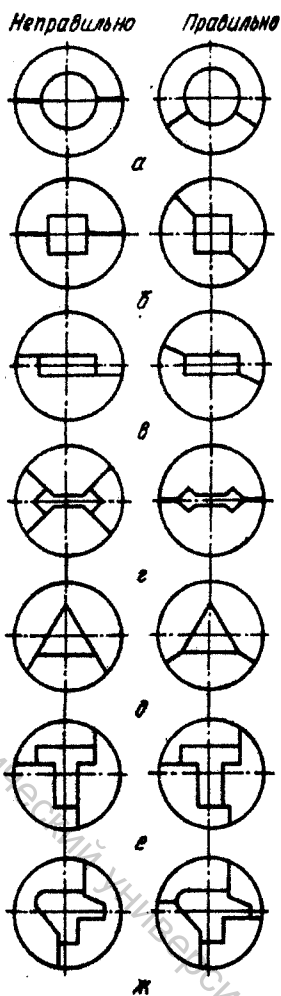


Рис. 3.13. Расположение плоскостей разъема разрезных матриц

- линии разреза должны быть по возможности радиальными: при этом упрощается технологический процесс изготовления разрезной матрицы и обеспечивается удобная подгонка секций (рис. 3.13, а, б, в, д);

194

двух секций, должны быть проведены так, чтобы секции, собранные для совместной обработки наружной поверхности, не имели свободы движения относительно друг друга в радиальном направлении (рис. 3.13, д, е, ж);

- линии разреза должны проводиться так, чтобы ни одна секция не имела узких глубоких пазов, труднодоступных для обработки (рис. 3.13, ж).

*Пресс-формы для калибрования и допрессовывания спеченных заготовок*

Общими требованиями для проектирования, изготовления и эксплуатации калибровочных и допрессовочных пресс-форм являются:

- обеспечение максимально возможной жесткости пресс-формы, поскольку калибрование является заключительной операцией технологического процесса и жесткостью пресс-формы определяются размеры готового изделия;

- пресс-форма должна иметь минимальное число зазоров и разъемов;

- конструкция пресс-формы должна предусматривать элементы, обеспечивающие ориентировку заготовок перед началом калибрования (рис. 3.14);

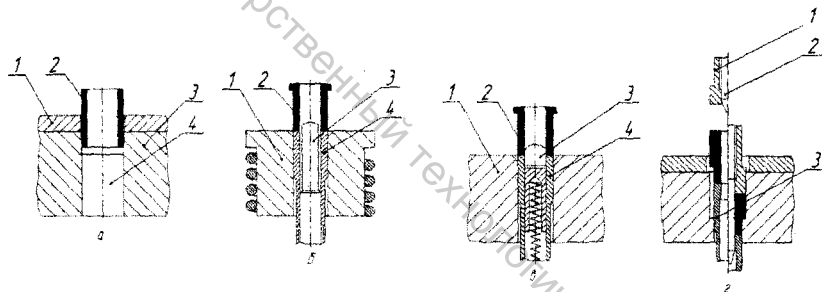


Рис. 3.14. Схемы ориентировки калибруемых заготовок:

а – по трафарету: 1 – трафарет; 2 – заготовка; 3 – матрица; 4 – выталкиватель; б – по матрице: 1 – подвижная матрица; 2 – заготовка; 3 – стержень; 4 – выталкиватель; в – по сердечнику: 1 – матрица; 2 – заготовка; 3 – сердечник; 4 – выталкиватель; г – по игле: 1 – пуансон; 2 – игла; 3 – выталкиватель

- размеры наружных поверхностей калибруют раньше, чем отверстий, во избежание образования трещин в изделиях;

- калиброванная поверхность должна оставаться в контакте с калибрующей поверхностью инструмента до окончания калибрования заготовки в целом;

- для обеспечения равномерности распределения плотности необходимо применять пресс-формы с независимым перемещением пуансонов и плавающей матрицей;

- конструкция пресс-формы должна обеспечивать последовательное калибрование поверхностей изделия, поскольку это способствует уменьшению усилия калибрования;

- шероховатость калибрующих поверхностей пресс-формы не должна превышать  $Rz\ 0,2$ ;

- конструкция пресс-формы должна учитывать способ смазки заготовки перед калиброванием и сопрягаться с конструкцией смазывающего устройства при его установке непосредственно на прессе.

### *Штампы для горячей штамповки порошковых заготовок*

Штампы для горячей штамповки порошковых заготовок состоят из тех же основных элементов, что и пресс-формы для прессования и калибрования порошков, – матрицы, пуансонов, стержней, загрузочных устройств и т.д. Однако отличия механизмов формообразования заготовки в пресс-форме и штампе, а также состояния материала прессовки и штампованной заготовки накладывают на конструкцию штампа и условия его эксплуатации ряд особенностей.

На рис. 3.15, а представлена схема штампа для штамповки гладких втулок. Штамп содержит верхний пуансон 1, матрицу 2, нижний пуансон-выталкиватель 3, плиту 4 для улавливания и фиксирования заготовки 5, направляемой в штамп из печи по лотку 6, подвижный стержень (иглу) 7.

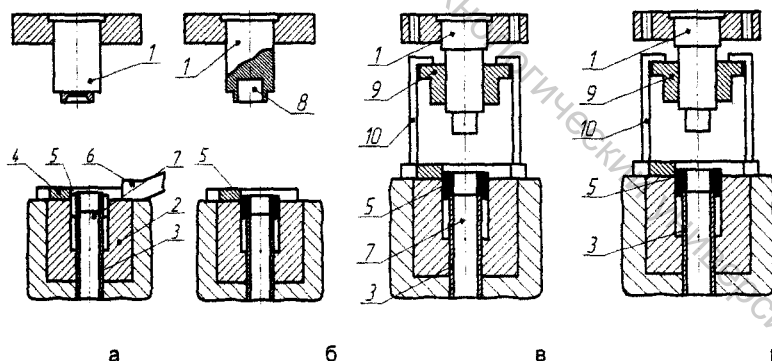


Рис. 3.15. Схемы штампов для горячей штамповки порошковых заготовок:

1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – пуансон-выталкиватель; 4 – плита; 5 – заготовка; 6 – лоток; 7 – игла; 8 – полость; 9 – пуансон; 10 – ограничитель.

В отличие от пресс-форм диаметр нижнего пуансона уменьшен по сравнению с диаметром матрицы, которая в результате этого выполняется с заплечиками. При такой конструкции практически исключается затекание металла в зазор между нижним пуансоном и матрицей, улучшаются условия выталкивания заго-



товки, облегчаются условия работы штампа. Игла может быть закреплена на нижней плите неподвижно (рис. 3.15, б). В этом случае пуансон 1 должен иметь полость 8, в которую входит игла в процессе формообразования заготовки.

На рис. 3.15, в, г представлена схема штампа с тремя пуансонами. Дополнительный третий пуансон 9 предназначен для уплотнения, а также выполняет роль съемника штампованной заготовки с пуансоном 1 при упоре в ограничитель 10. При перемещении нижнего пуансона-выталкивателя 3 вниз игла 7 проходит через отверстие заготовки. Уплотнение заготовки осуществляют пуансоном при подвижной игле, формирующая часть которой в процессе уплотнения извлекается из заготовки, и завершение формообразования отверстия производится на формирующей части пуансона 1. Рабочая часть этого пуансона, формообразующая отверстие, выполняется по высоте на 0,5—1 мм больше высоты штампованной заготовки.

Игла в штампе может отсутствовать (рис. 3.15, г). В этом случае высота рабочей части пуансона 1, формообразующая отверстие, выполняется меньше высоты исходной заготовки, но на 1—3 мм больше высоты штампованной заготовки. При таком изготовлении не происходит затекания металла в отверстие выталкивателя и в зазор между пуансоном и выталкивателем в процессе формообразования.

Штамповку заготовок сложного профиля небольшой высоты с плоскопараллельными торцами (цилиндрические зубчатые колеса, кулачки, фасонные шайбы, копиры и т.д.) осуществляют в штампах с верхним пуансоном, не заходящим в полость матрицы (рис. 3.16).

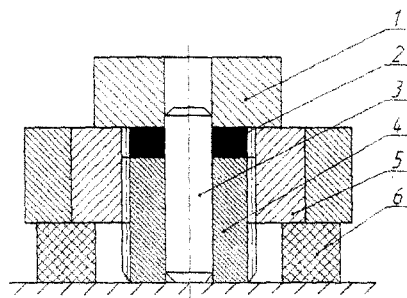


Рис. 3.16. Схема штампа для деформации заготовки сложного профиля: 1 – незаходящий пуансон; 2 – заготовка, полученная в штампе; 3 – игла; 4 – нижний пуансон; 5 – матрица; 6 – демпфер

Штамповку осуществляют в следующей последовательности. На торец матрицы 5 укладывают полу заготовку, которая фиксируется отверстием по выступающей части иглы 3. Давление на заготовку передается торцом верхнего пуансона 1, размеры которого превышают размеры полости матрицы. Деформация заготовки осуществляется в процессе перемещения вниз верхнего незаходящего пуансона 1 и

матрицы 5, которая скользит относительно находящихся неподвижно нижнего пуансона 4 и иглы 3. Деформация заготовки завершается при соприкосновении торцов верхнего незаходящего пуансона 1 и матрицы 5. При этом размеры высот матрицы и нижнего пуансона определяются таким образом, чтобы произошло полное заполнение деформируемым материалом полости матрицы.

Для извлечения полученной поковки штамп переворачивается и устанавливается на специальную подкладную плиту. Затем из поковки выталкивается игла, а сама поковка выпрессовывается из матрицы нижним пуансоном.

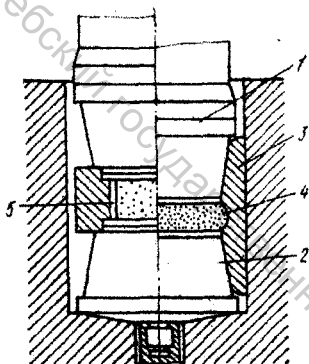


Рис. 3.17. Штамп для заготовок с малым запасом технологической пластичности:

1 — верхний пуансон; 2 — нижний пуансон; 3 — кольцевой бандаж; 4 — заготовка; 5 — прокладки

и пуансонов.

Благодаря такой конструкции штампа осуществляется боковой подпор деформируемой заготовки. Для уменьшения теплотерь между пуансонами, кольцевым бандажом и нагретой заготовкой между ними размещают прокладки 5 из листового жаропрочного сплава.

### **3.8. Проектирование порошковых заготовок, формируемых в закрытых пресс-формах**

Сложность изготовления прессующего инструмента, его стойкость и стоимость во многом определяют целесообразность изготовления той или иной детали методами порошковой металлургии. Особенно важно определить оптималь-

ную конфигурацию детали при массовом производстве. В ряде случаев целесообразно, рассмотрев конструкцию узла машины, изменить конфигурацию изготавливаемой детали и, соответственно, сопрягаемой с ней детали таким образом, чтобы сделать ее более технологичной при изготовлении методами порошковой металлургии (уменьшить число переходов, сгладить выступы и т.д.). Это позволит изготовить более простой и технологичный инструмент и создать предпосылки для ее массового изготовления. Ниже приведен ряд рекомендаций по изменению конструкции изготавливаемой детали с целью облегчения процесса формирования и упрощения конструкции инструмента.

Одним из основных геометрических показателей, характеризующих возможность изготовления детали методами порошковой металлургии, является отношение ее длины к поперечным размерам изделия. Особо благоприятным для получения равномерной плотности прессовки является соотношение этих показателей 1:1. Однако практически это соотношение может изменяться в широких пределах. Например, при двустороннем прессовании на прессах-автоматах можно получить удовлетворительные результаты по равномерному распределению плотности прессовки при соотношении 3 : 1 или даже 4 : 1. При изостатическом и мундштучном формовании его можно значительно увеличить.

Если деталь имеет выступ на одном конце, что создает значительную разницу в прилегающих сечениях, то целесообразно спрессовать с симметричным выступом на другом конце, удалив выступ механической обработкой после спекания. Тонкие стенки, острые углы, узкие шпоночные канавки ослабляют деталь и при выталкивании за счет сил упругого последействия она может разрушиться в этих местах, поэтому их следует избегать, а при необходимости после спекания получать механической обработкой.

Закругленные углы в прямоугольных отверстиях способствуют лучшему передвижению порошка при прессовании (рис. 3.18, а), а небольшие площадки при прессовании круглых поверхностей обеспечивают повышенную стойкость пуансонов, так как устраняют острые углы на торцевых поверхностях (рис. 3.18, б). Рекомендуются скосы на пуансонах заканчивать не острыми углами, а площадкой шириной 0,12—0,25 мм. Закругления в местах присоединения фланца к корпусу детали необходимо делать радиусом не менее 0,25 мм, причем слишком большой радиус также нежелателен.

Выполнение отверстий любой конфигурации в направлении прессования не представляет большой сложности, но если отверстия небольшого сечения, то

необходимо применять тонкие стержни, однако они изгибаются в процессе прессования и быстро изнашиваются под действием порошка. Надо также учитывать, что для выполнения цилиндрических отверстий используют круглые стержни, которые легко обрабатываются. Для прессования деталей с прямоугольными, эллипсными, квадратными и другими фигурными отверстиями требуется более сложный инструмент и, соответственно, более сложное оборудование для его изготовления. Поэтому целесообразно, где это не сказывается на технических характеристиках детали, прессовать их с отверстиями круглой формы. При изготовлении заготовки с несколькими отверстиями рекомендуются для применения соотношения размеров (рис. 3.18, в).

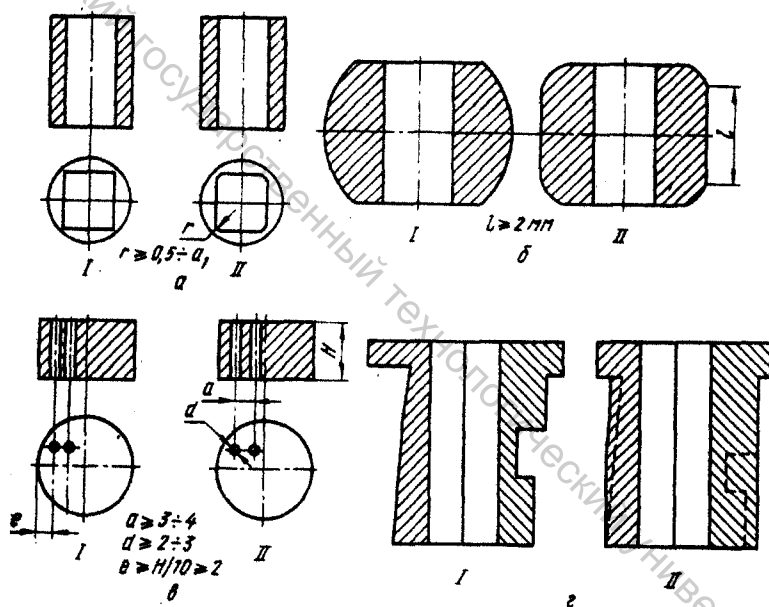


Рис. 3.18. Нерациональные (I) и рациональные (II) конструкции порошковых деталей:

а – с прямоугольными отверстиями; б – с плоскими площадками; в – с эксцентричными отверстиями; г – с прямоугольными пазами

Круглые канавки, резьбу, обратную конусность лучше выполнять механической обработкой после спекания, а в прессуемой детали их надо убрать (рис. 3.18, г). Это относится и к отверстиям, находящимся под прямым углом к направлению прессования. Изготовление глухих отверстий в процессе прессования не представляет особых затруднений. Однако в данном случае необходимо пре-

дусмотреть скосы на дне полости и определенные соотношения между высотой детали и глубиной отверстия (рис. 3.19, а).

При глубоких и узких шлицах и выступах в детали значительно усложняется изготовление матриц и уменьшается их прочность. Поэтому в данном случае целесообразно изменить конфигурацию детали (рис. 3.19, б, в). Для повышения стойкости пуансонов выступы на переходах должны быть толщиной не менее 3 – 4 мм и не должно быть больших перепадов по высоте в направлении прессования (рис. 3.19, г).

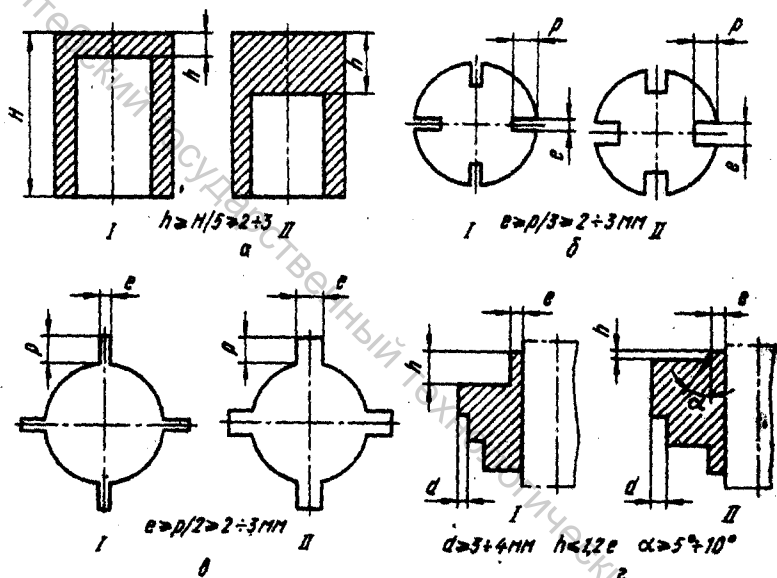


Рис. 3.19. Нерациональные (I) и рациональные (II) конструкции порошковых деталей: с пазами, выступами и глухими отверстиями:

а – с глухим отверстием; б – с продольными пазами; в – с продольными выступами; г – ступенчатых.

Толщина стенок должна быть не менее 0,8 мм. Если деталь имеет большие различия в толщине стенок ( $> 2.5$  мм), то необходимо изменить конструкцию. Если деталь имеет длинную выступающую часть, то для увеличения жесткости следует прессовать ее с дополнительным ребром. Иногда в подобных случаях более целесообразно изменить конструкцию детали, увеличив толщину выступающей части или приблизив ее к одному из торцов детали (рис. 3.20, а, б, в).

При прессовании деталей с выступами и выемками, которые оформляются верхним пуансоном, необходимо выполнять в них конусность в пределах  $5 - 10^\circ$  для облегчения выталкивания (рис. 3.20, г, д).

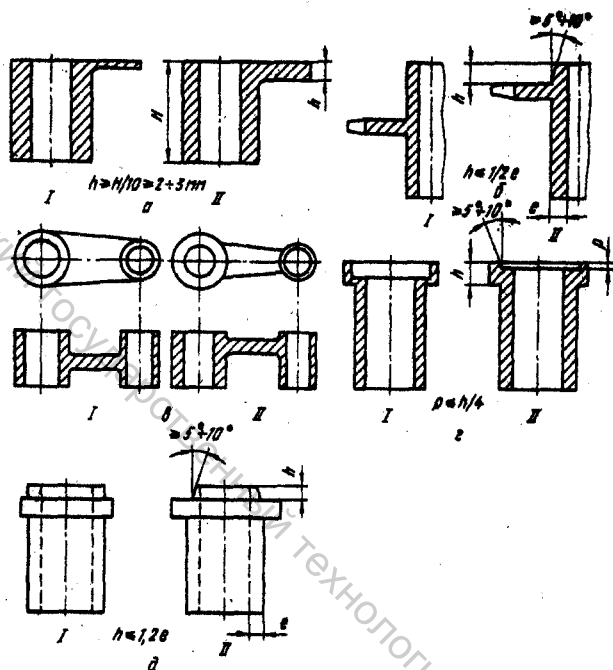


Рис. 3.20. Нерациональные (I) и рациональные (II) конструкции порошковых деталей с выступами (а, б, в, д) и выемками (е)

### 3.9. Изостатическое прессование

Одним из наиболее перспективных методов получения крупногабаритных заготовок и изделий из порошков является метод изостатического (всестороннего) прессования, основное преимущество которого заключается в возможности получения заготовок и изделий с равномерно распределенной по объему плотностью. Это достигается равномерным приложением давления ко всем внешним поверхностям прессуемого порошка. При этом практически отсутствуют потери давления на внешнее трение. Отсутствие потерь на внешнее трение и равномерное давление при изостатическом прессовании обеспечивают необходимую плотность брикетов при давлениях, значительно меньших, чем при прессовании в закрытых пресс-формах.

Применяют три основных вида изостатического прессования:

- гидростатическое;
- изостатическое формование в толстостенной эластичной оболочке;
- горячее изостатическое прессование (газостатическое, гидростатическое).

#### *Гидростатическое прессование*

При гидростатическом прессовании порошков в качестве среды, передающей давление, применяют жидкости, отвечающие следующим требованиям:

- они не должны вступать в реакцию с материалами источника давления, элементов уплотнения и эластичной оболочки;
- должны обладать низкой сжимаемостью;
- иметь низкую текучесть при высоких давлениях;
- быть недорогими и недефицитными.

В качестве рабочих жидкостей чаще всего применяют водные эмульсии различных масел, глицерин, чистые минеральные масла, можно использовать и воду при условии добавки в нее ингибиторов ржавчины.

Материалами эластичных контейнеров при гидростатическом прессовании являются, чаще всего, тонкостенная резина в виде специально изготавливаемых для этой цели оболочек-чехлов либо латекс, наносимый на поверхность предварительно сформированной заготовки методами окунания с последующей сушкой.

Типичные примеры пресс-инструмента для гидростатического прессования представлены на рис. 3.21. С его помощью можно изготавливать простые цилиндрические заготовки.

На рис. 3.21, а показан простейший из возможных чехлов, состоящий из тонкого латексного чехла, например, в виде игрушечного воздушного шара. Порошок засыпают через горловину, которую затем герметично закрывают с помощью плотно прилегающей резиновой пробки, которая закрепляется снаружи горловины эластичной лентой. Форма прессовки будет аналогична, но меньше по размеру, чем исходная форма чехла. Любые вариации засыпки или утряски порошка будут проявляться в виде утяжек прессовки. Ресурс работы такого чехла мал; для твердых остроконечных порошков возможно одно или два прессования. Для мягких мелкодисперсных порошков количество циклов прессования может достигать нескольких десятков. Такой тип чехла не рекомендуется использовать

для порошков вязких металлов, так как чехол при этом прилипает к спрессованной заготовке и плохо от нее отделяется. На рисунке 3.21, а показан чехол простойшей цилиндрической формы; в действительности можно получать заготовки более сложной формы при условии использования тонкого чехла. Например, были использованы латексные пресс-формы для литья гипсовых фигур, и с их помощью получались спрессованные заготовки с хорошо различимыми мелкими деталями.

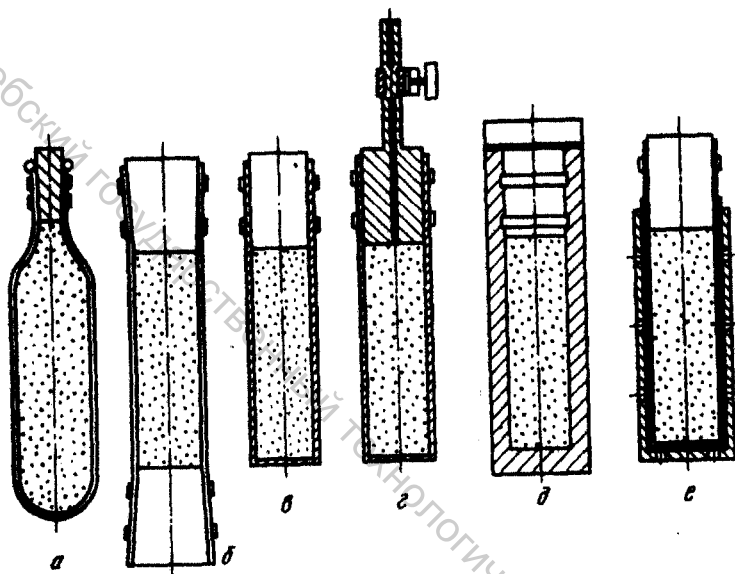


Рис. 3.21. Пресс-инструмент для гидростатического прессования:

а – тонкостенный латексный чехол; б – трубчатый чехол из поливинилхлорида; в – трубчатый чехол с закрытым торцом; г – устройство для установки чехлов; д – толстостенный чехол; е – перфорированная обойма

На рис. 3.21, б показан трубчатый чехол из технического поливинилхлорида. Для уплотнений таких чехлов используют две заглушки (пробки) и герметизирующие приспособления. Чем толще стенка трубы, тем лучше форма получаемой данным методом заготовки.

На рис. 3.21, в показан чехол с одним закрытым торцом, разработанный для получения компактных заготовок требуемых размеров.

На рис. 3.21, г показано устройство, которое может быть использовано для любой из представленных на рисунке схем. Это устройство состоит из пробки с



трубкой, используемой в дальнейшем после засыпки порошка и герметизации пробки для удаления воздуха из чехла. После вакуумирования трубка пережимается специальной скобой и в таком виде проводится прессование. Предварительная откачка воздуха обеспечивает повышение плотности заготовки.

На рис. 3.21, д показан толстостенный литой чехол с заглушкой, которая может быть изготовлена из самых разных материалов. Преимущества такой конструкции заключаются в повышенном ресурсе работы чехла, стабильности формы чехла при засыпке порошка и возможности получать прессовки заданной формы. Благодаря стабильности размеров толстостенного чехла, меньшему прилипанию порошка к материалу чехла, использование чехла с равномерной толщиной стенки обеспечивает лучшую воспроизводимость и предсказуемость прессования. К недостаткам толстостенных чехлов относится возможность расслоения заготовки за счет повышенной запасенной упругой энергии чехла, приводящей к разрыву спрессованной заготовки на стадии разгрузки.

На рисунке 3.21, е показана жесткая перфорированная обойма, используемая для придания большей жесткости чехлу во время засыпки порошка и установки чехла в рабочую зону гидростата. Такая конструкция особенно эффективна при использовании тонкостенных чехлов, неспособных сохранить свою форму, например чехлов с квадратным поперечным сечением. Обойма должна быть плотно подогнана по внешнему диаметру чехла; она может быть изготовлена из металла или пластмассы в виде сплошного или перфорированного листа. В случае использования сплошной фольги в ней необходимо просверлить несколько отверстий в боковых стенках и в основании для обеспечения поступления распределения жидкости и ее дренажа после прессования.

Конфигурация чехла перед засыпкой в него порошка соответствует конфигурации перфорированного стакана и эквидистантна форме заготовки. Эта эквидистантность сохраняется в течение всего процесса формования.

Прессование осуществляется на гидростатах насосного или плунжерного типа (рис. 3.22). Промышленные гидростаты насосного типа имеют внутренний диаметр рабочего цилиндра до 600 мм, высоту рабочего объема цилиндра до 2000 мм. Базой для создания гидростатов плунжерного типа являются станины серийных гидропрессов, оснащаемых цилиндрами высокого давления, либо специальные рамы-станины, изготавливаемые путем намотки высокопрочной стальной проволоки или ленты на каркас.

### Изостатическое формование в толстостенной эластичной оболочке

Реализация процесса возможна при соблюдении следующих условий. Материал оболочки должен обладать способностью принимать и сохранять определенную форму, соответствующую форме изделия, вести себя подобно жидкости, что необходимо для равномерной передачи давления на порошок; иметь определенную упругость, обеспечивающую возвращение оболочки в первоначальное положение после снятия давления; не склеиваться или схватываться с порошком; быть долговечным и дешевым, допуская многократное использование. Оболочки можно изготавливать из парафина, воска, водного раствора желатина с добавками глицерина, эпоксидных смол и резиновой массы.

На рис. 3.23 показано устройство для реализации процесса на универсальных гидравлических прессах.

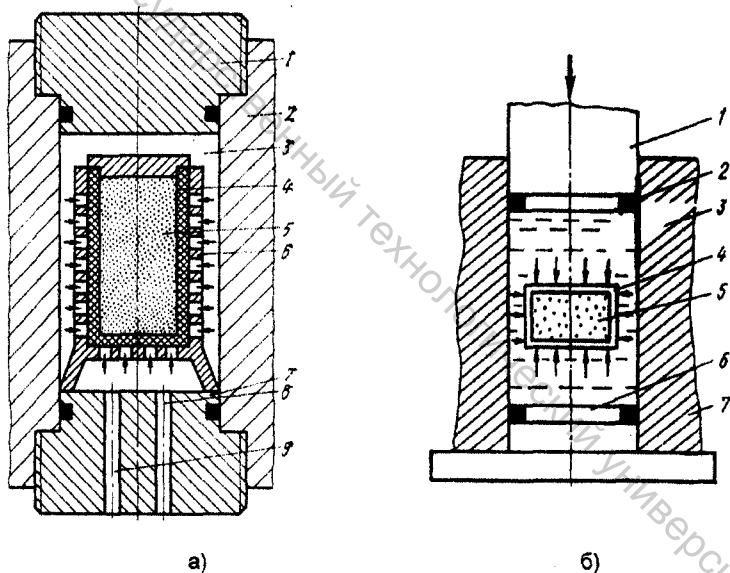


Рис. 3.22. Схемы гидростатов

а – насосного типа

1 – верхний затвор, 2 – камера высокого давления; 3 – жидкость; 4 – эластичная оболочка; 5 – порошок; 6 – перфорированный короб; 7 – нижний затвор; 8 – отверстие для ввода жидкости высокого давления; 9 – отверстие для слива жидкости

б – плунжерного типа

1 – плунжер, 2 – уплотнение; 3 – жидкость; 4 – эластичная оболочка, 5 – порошок; 6 – днище; 7 – рабочий цилиндр

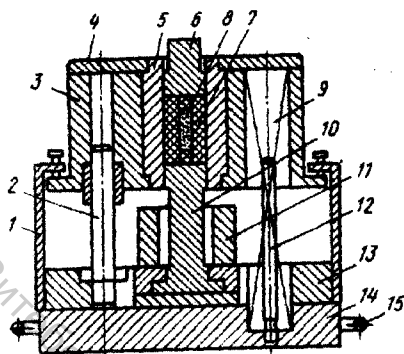


Рис. 3.23. Устройство для изостатического формования в толстостенных эластичных оболочках 1 – ограничитель; 2 – направляющая втулка; 3 – обойма; 4 – крышка; 5 – матрица; 6 – верхний пуансон; 7 – толстостенная оболочка; 8 – прессуемый порошок; 9 – пружина; 10 – нижний пуансон; 11 – вилка; 12 – стержень; 13 – верхняя плита; 14 – нижняя плита; 15 – ручка

Устройство работает следующим образом. Толстостенная эластичная оболочка 7 с порошком загружается в матрицу 5. Внутреннюю поверхность матрицы для уменьшения трения оболочки о стенки смазывают тонким слоем веретенного масла. Через верхний пуансон 6 к оболочке прикладывается давление. Деформируясь под действием приложенного давления, оболочка за счет увеличивающегося трения между наружной поверхностью и стенками матрицы увлекает за собой обойму 3. Нижний пуансон 10, неподвижный по отношению к обойме, обеспечивает дополнительную допрессовку с другой стороны. При сравнительно небольшом отношении высоты прессуемого изделия к его диаметру (до 5) нижняя допрессовка не обязательна. Ход верхнего и нижнего пуансонов регулируется винтами на ограничителях 1. Прессование на такой установке можно вести по давлению и до упора, т.е. до того момента, когда блок обоймы с матрицей под действием давления опустится на вилку 11.

Прессование до упора более удобно для массового производства, причем высотой вилки можно регулировать высоту прессуемой детали. Эластичная оболочка из матрицы выпрессовывается путем перемещения вилки наверх обоймы и приложением к ней давления. Во время опускания матрицы нижний пуансон выталкивает оболочку из матрицы. После снятия давления пружины 9 возвращают блок матрицы в исходное положение. После снятия одной из торцевых пробок деталь вынимают из оболочки.

На рис. 3.24 представлены образцы заготовок режущего инструмента, полученных изостатическим формованием в толстостенных оболочках. Развитие процессов изостатического формования в толстостенных оболочках осуществляется в направлении расширения технологических оболочек путем приложения гидростатического давления на боковую наружную поверхность (прессование на оправку) или внутреннюю поверхность (прессование на матрицу).

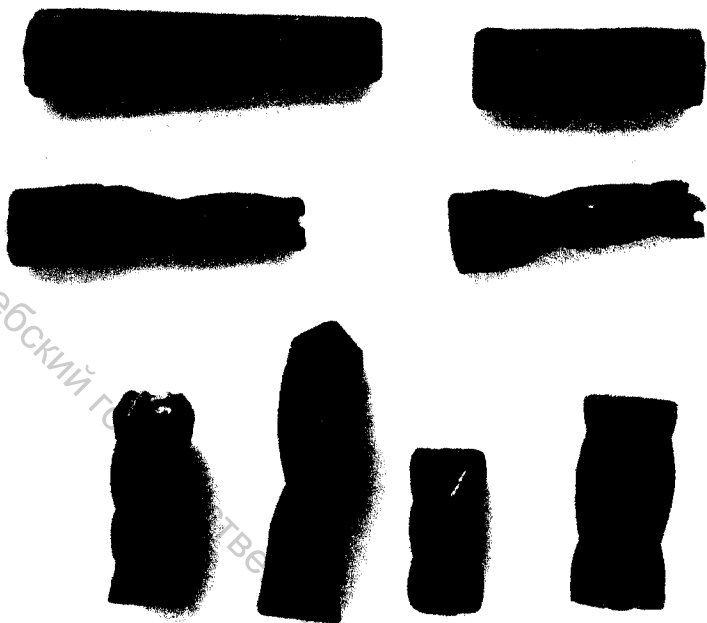


Рис. 3.24. Заготовки режущего инструмента

На рис 3.25. представлена схема устройства для изостатического прессования на оправку.

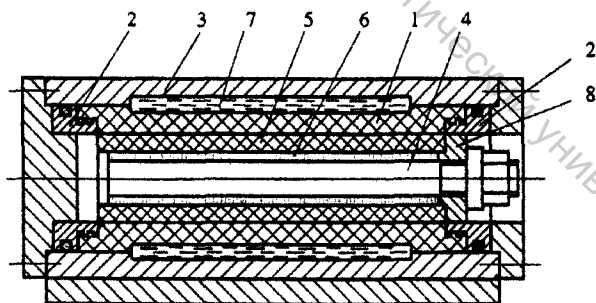


Рис. 3.25. Схема устройства для изостатического прессования на оправку

1 – эластичный вкладыш; 2 – уплотняющие элементы; 3 – корпус; 4 – оправка; 5 – эластичная оболочка; 6 – прессовка; 7 – жидкость; 8 – упорное кольцо

Прессование порошка 6 осуществляется в форме, состоящей из формообразующего стержня (оправки) 4 и эластичной оболочки 5. Конструкция устройства выполняется таким образом, что осевые перемещения и деформации эластичного вкладыша 2 исключаются. Исключены также осевые деформации элементов формы и прессуемой заготовки. Герметичный кольцевой зазор 7 (рабочая полость устройства) заполняется рабочей жидкостью, как правило, маслом. Центральное отверстие эластичной оболочки 5 совместно с упорными кольцами 8 образуют полость рабочей камеры для прессования.

При создании высокого давления в рабочей полости 7 эластичные вкладыш 2 и оболочка 5 равномерно передают давление на наружную поверхность уплотняемой заготовки, напрессовывая ее на оправку 4 по всей длине. После сброса давления оправка извлекается из устройства, а спрессованное изделие снимается с оправки.

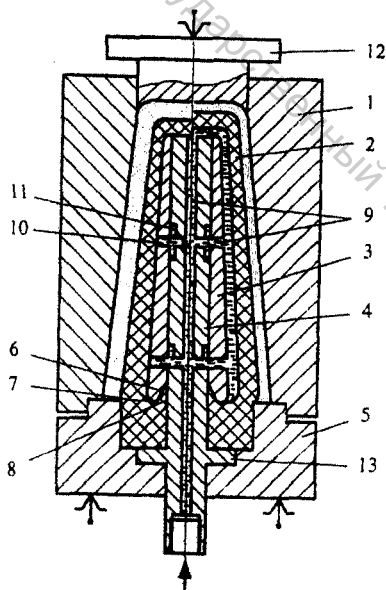


Рис. 3.26. Схема устройства для формирования изделий с глухим отверстием

1 – матрица; 2 – эластичная оболочка; 3 – аставка; 4 – стержень; 5 – основание; 6 – отверстие; 7 – торец; 8 – поверхность свободная; 9, 10, 11 – каналы; 12 – упор; 13 – опора (ступень)

На рис. 3.26 представлена схема устройства для прессования на матрицу. В рассматриваемом устройстве эластичная оболочка имеет лишь один уплотняющий элемент, а давление жидкости при работе устройства передается на прессуемый порошок не только в радиальном направлении, но и в осевом, т.е. имеет место объемная схема деформированного состояния порошковой заготовки. Кроме того, стержень 4 выполняется ступенчатым для предотвращения осевого перемещения от давления жидкости на торец. На рис. 3.27 представлены некоторые порошковые изделия, полученные прессованием на оправку и прессованием на матрицу.

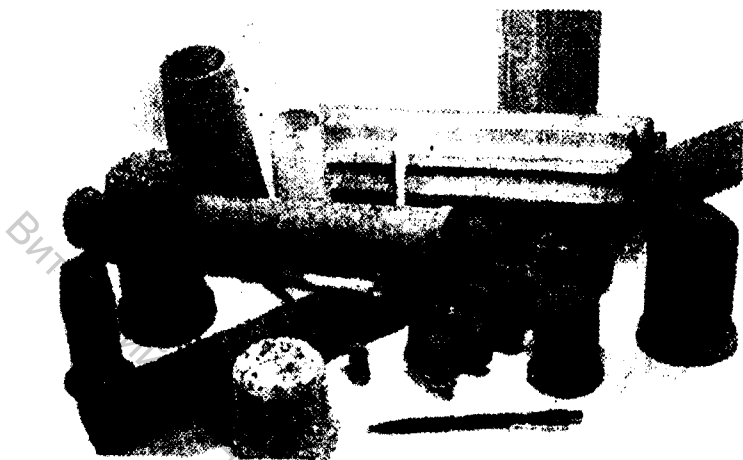


Рис. 3.27. Порошковые заготовки для фильтров

#### *Горячее газостатическое формование*

Особенность технологий получения заготовок методом горячего газостатического формования заключается в совмещении процессов формования и спекания. В качестве среды, передающей давление, применяют инертный газ. Способом горячего газостатического формования изготавливают крупногабаритные и сложные изделия из порошков тугоплавких металлов, порошковых быстрорежущих сталей, конструкционной керамики. Плотность изделий, полученных горячим газостатическим формованием, приближается к плотности компактного материала.

Капсулы для горячего газостатического формования представляют собой штампосварную конструкцию из листовой стали толщиной 1 – 6 мм (рис. 3.28). Капсулы сложной конфигурации включают участки с существенно различной жесткостью, вследствие чего в процессе деформирования может происходить нерегламентируемое искажение конфигурации капсул, сопровождаемое искажением конфигурации или разрушением прессовки. Основным способом борьбы с искажением конфигурации капсул является направленное изменение жесткости отдельных ее элементов с целью обеспечения требуемой последовательности и

степени их деформирования. Например, для усиления отдельных элементов принимают ребра жесткости, местные утолщения стенок, конусные поверхности и др.

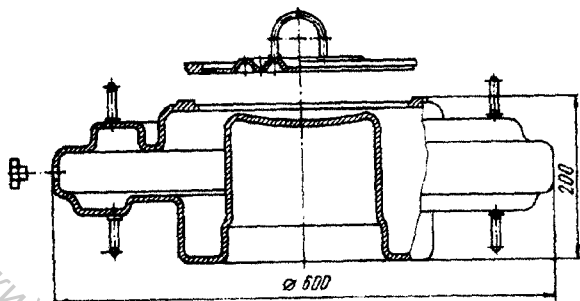


Рис. 3.28. Конфигурация капсулы для горячего изостатического формования

Процесс горячего газостатического формования осуществляется в следующей последовательности.

Порошок засыпают в металлические капсулы; дегазируют при остаточном давлении меньше или равном 1,3 Па и температуре 0,3 – 0,5 Тпл; подвергают виброуплотнению с целью повышения относительной плотности до 0,6 – 0,65; капсулы герметизируют сваркой и помещают в рабочий цилиндр газостата (рис. 3.29).

Рабочий цикл газостата включает следующие стадии:

- размещение капсул на нижней пробке; для обеспечения равномерного прогрева садки капсулы разделяют перфорированными прокладочными кольцами;
- трех-, четырехкратное вакуумирование с продувкой аргоном;

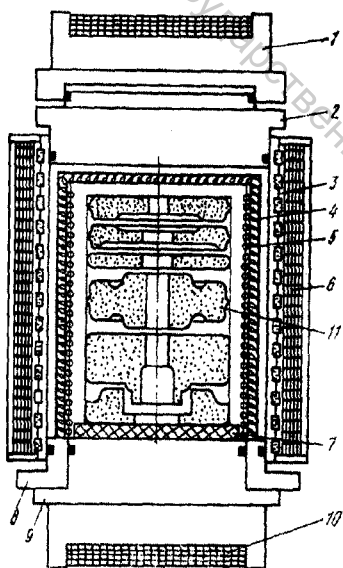


Рис. 3.29 Схема рабочего цилиндра с размещенной в нем садкой

- 1 – рама; 2 – верхняя пробка; 3 – контейнер; 4 – термоизоляционный колпак; 5 – нагреватель; 6 – обмотка контейнера; 7 – термоизоляционная подставка; 8 – промежуточная пробка; 9 – нижняя пробка; 10 – обмотка рамы; 11 – капсулы с порошком

- создание давления в рабочем цилиндре путем его соединения с газовой баллонами и последующее повышение с помощью компрессора;
- подъем температуры со скоростью 200 – 400 °С/ч до требуемого уровня;
- изотермическую выдержку;
- охлаждение садки и аргона при постепенном снижении мощности, потребляемой нагревателем;
- перекачку аргона в газовые баллоны;
- выгрузку садки.

### Горячее гидростатическое формование

Горячее гидростатическое формование осуществляют на плунжерных гидростатах двух типов: с обогреваемым контейнером и необогреваемым.

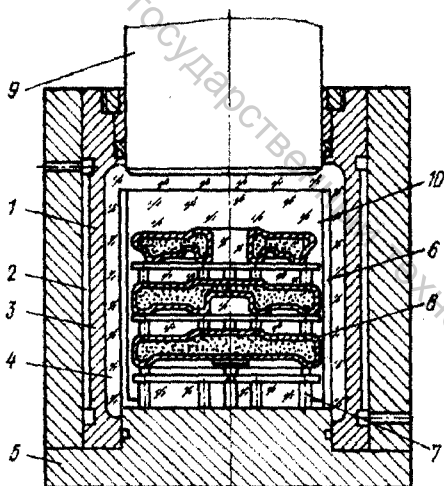


Рис. 3.30. Гидростат горячего прессования с обогреваемым контейнером

- 1 – контейнер; 2 – водоохлаждаемые каналы;  
3 – кольцевой зазор; 4 – теплоизоляция; 5 – нижняя пробка; 6 – электронагреватели; 7 – стол;  
8 – капсула; 9 – подвижный плунжер; 10 – расплавленная среда

Гидростат с обогреваемым контейнером (рис. 3.30) работает следующим образом. С помощью электронагревателей 6 рабочую среду 10, например, стекло, нагревают в контейнере 1 до температуры 1100—1300 °С. При этом через каналы 2, равномерно размещенные по окружности, пропускают воду, которая предотвращает перегрев контейнера 1 и теплоизоляции 4. Механизмом (на рисунке не показан) в контейнер 1 опускают предварительно заполненные герметизированные разогретые до температуры рабочей среды капсулы 8.

Ходом подвижной траверсы пресса (на рисунке не показана)

в контейнер 1 вводят плунжер 9, который создает в полости контейнера 1 необходимое давление. Под этим давлением и при указанной температуре капсулы 8



удерживают в течение требуемого времени. После этого плунжер 9 выводят из контейнера 1; извлекают капсулы 8, и цикл повторяется.

Гидростаты с обогреваемым контейнером позволяют отказаться от применения дорогостоящих газостатов; использовать универсальное гидропрессовое оборудование. Однако конструкции гидростатов с обогреваемым контейнером сложны в изготовлении и эксплуатации.

Гидростаты с необогреваемым контейнером (рис. 3.31) предназначены только для прессования. Нагрев передающей давление среды, а также капсул с порошком производится отдельно в универсальных печах (рис. 3.32).

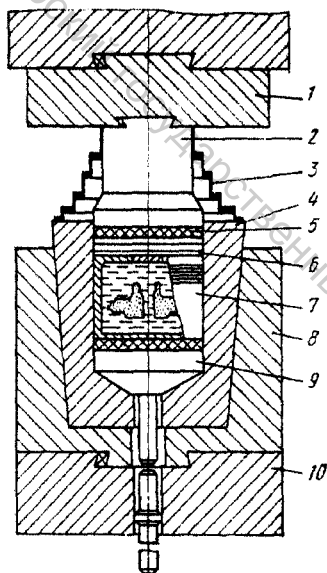


Рис. 3.31. Гидростат горячего прессования с необогреваемым контейнером:

1 — опорная плита; 2 — пуансон; 3 — телескопическая защита; 4 — рабочая втулка контейнера; 5 — шлаковая шайба; 6 — пресс-шайба; 7 — обечайка с расплавом и капсулой; 8 — опорная втулка контейнера; 9 — выталкиватель; 10 — выдвижной стол пресса.

Цикл прессования включает:

- установку капсулы с порошком 6 в обечайку 2 (рис. 3.32);
- заполнение обечайки расплавленной средой и герметизацию обечайки;

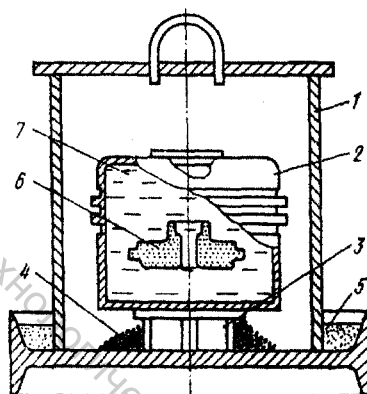


Рис. 3.32. Схема безокислительного нагрева в универсальной печи:

1 — защитный колпак; 2 — обечайка; 3 — подставка; 4 — древесный уголь или кокс; 5 — песчаный затвор; 6 — капсула с порошком; 7 — расплавленная среда

- нагрев блока (обечайка с капсулой) и контейнера в печи;
- размещение блока в контейнере и установку контейнера на стол пресса;
- прессование и выдержку под давлением;
- извлечение блока из контейнера, охлаждение, освобождение капсулы.

Основными достоинствами гидростатов по сравнению с газостатами являются: возможность использования существующих печей и прессов в качестве нагревательных и нагружающих устройств; возможность реализации давлений до 1000 МПа; возможность увеличить на два порядка и более скорости приложения и снятия давления.

К основным недостаткам горячих гидростатов относятся: ограниченные возможности одновременного формования нескольких заготовок, связанные с ограниченной высотой рабочего пространства прессов; ограниченная (<30 мин) продолжительность выдержки под давлением, обусловленная опасностью перегрева и отпуска материалов элементов контейнера; усадка порошка внутри капсулы во время нагрева блока, обуславливающая возможность неконтролируемой потери устойчивости тонкостенных капсул при прессовании и последующее искажение формы заготовки; необходимость использования различных, оптимальных по вязкости, рабочих сред при прессовании порошков различных материалов.

#### *Горячее формование сыпучей средой*

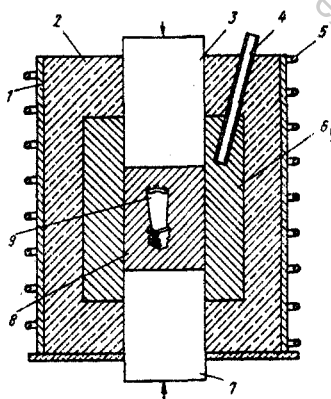


Рис. 3.33. Схема установки для горячего изостатического прессования с передачей давления через сыпучую среду

1 – кожух; 2 – слой теплоизоляции; 3 – графитовый верхний пуансон; 4 – термопара; 5 – индукционный нагреватель; 6 – графитовая матрица; 7 – графитовый нижний пуансон; 8 – сыпучая среда; 9 – прессовка

В экспериментальных целях или в условиях единичного производства получение заготовок простой конфигурации может быть осуществлено способом горячего прессования в сыпучей среде. На рис. 3.33 представлена принципиальная схема устройства для горячего изостатического прессования с передачей давления через сыпучую среду. Устройство работает следующим образом. Усилие, создаваемое внешним ис-

точником, например, гидравлическим прессом, прикладывается к верхнему 3 и нижнему 7 пуансонам и гидростатически передается через сыпучую среду 8 к прессуемому порошку 9, заключенному в эластичную оболочку.

Сыпучая среда — порошки нитрида бора или графита. Температура измеряется термпарой 4. Давление к сыпучей среде может прикладываться как непосредственно пуансоном (плунжером), так и через жидкую среду, отделенную от сыпучей эластичной оболочкой.

Применение графитовых пуансонов и матрицы позволяет поднимать и поддерживать достаточно высокую температуру, необходимую для спекания тугоплавких материалов.

### **3.10. Импульсное формование**

Импульсное формование порошков можно осуществлять либо многократным воздействием на порошок импульсами давления относительно небольшой амплитуды – наложением вибраций, либо воздействием на порошок одним или несколькими импульсами большой амплитуды. В первом случае процесс называют *вибрационным*, во втором – *импульсным формованием*.

#### ***Вибрационное прессование***

Применение вибрации при прессовании позволяет снизить давление прессования в десятки раз. Вибрация разрушает образующиеся арки и мостики и увеличивает подвижность частиц, что значительно повышает плотность укладки частиц, которая достигает > 95 % от теоретически возможной. Наиболее эффективно вибрация сказывается при формовании порошков, представляющих собой определенную совокупность фракций. Вибрационное прессование целесообразно применять для уплотнения порошков твердых и хрупких металлов, которые практически пластически не деформируются. Плотность прессовок из указанных порошков в основном определяется условиями заполнения пресс-формы. В этом случае положительное влияние вибрации связано с разрушением начальных межчастичных связей и улучшением взаимоподвижности частиц.

Известны два основных вида вибрационного прессования, которые различаются характером передачи вибрации на порошок:

а) прессование по схеме "вибрирующего контейнера", когда вибрированию подвергается контейнер, в котором порошок уплотняется под действием собственной массы. По этой схеме высокую плотность можно получить практически без

приложения внешнего давления и, что особенно важно, можно получить равномерное распределение плотности по объему брикета;

б) прессование по схеме "вибрирующих пуансонов", когда уплотнение порошка происходит под действием вибрации верхнего или нижнего пуансона или обоих пуансонов одновременно. Давление при этом снижается незначительно.

Вибрационное прессование значительно облегчает изготовление изделий сложной формы. Доказано, что порошковая масса при вибрировании приобретает свойства вязкой жидкости и хорошо заполняет формы различной сложности. При изготовлении методом вибрационного прессования изделий сложных форм целесообразно применение графитовых матриц, в которых можно было бы в дальнейшем их спечь. Частоты, применяемые при вибрационном прессовании, обычно невелики и равны 50—100 Гц при амплитудах 5—30 мкм. Применение вибрационного прессования в ряде случаев целесообразно и при прессовании пластичных порошков. В этом случае давление прессования снижается незначительно, но зато улучшается равномерность распределения плотности, особенно у торцов брикета.

Уплотнение порошков под действием вибрации происходит довольно быстро, в течение нескольких секунд. Продолжительность уплотнения зависит от формы частиц и гранулометрического состава порошка. Более гладкие и простые по форме частицы уплотняются быстрее. Лучше уплотняется и порошок, содержащий частицы разного размера, чем порошок, состоящий из частиц одинакового размера. С увеличением шероховатости частиц, усложнением их формы, а также с уменьшением размеров частиц необходимо применять более высокую частоту вибрирования и прикладывать большую нагрузку к порошку. Для порошка с хрупкими частицами необходима более высокая частота. При вибрационном прессовании малопластичных материалов для получения плотных и прочных брикетов необходимы и небольшие нагрузки на порошок (300—600 кПа). Это объясняется тем, что вибрация, повышая подвижность частиц, способствует более плотной их укладке, а приложенное давление обеспечивает заклинивание частиц в этом положении.

Для уменьшения межчастичного трения в процессе вибрационного прессования применяют инертные и поверхностно-активные смазки. Оптимальное количество инертной смазки при размере частиц 1—5 мкм составляет 0,5—1,5 %. Поверхностно-активных смазок добавляют в 10 раз меньше, так как при больших

количествах смазки может произойти разделение частиц порошка толстыми масляными пленками.

Определяющими факторами вибрационного формования являются форма частиц порошка и распределение их по размерам. Обычно при этом методе используют две фракции порошка, причем размер частиц одной из фракций должен быть в 50—100 раз меньше. В этом случае зазоры между крупными частицами заполняются мелкими частицами, и плотность укладки достигает 90%. Чтобы во время вибрационного формования не выбивалась мелкая фракция, порошок перед формованием увлажняют. В качестве увлажнителя применяют воду или 5 %-ный раствор глицерина в метаноле. В зависимости от вида порошка вводят определенное количество увлажняющей жидкости с таким расчетом, чтобы порошок получился полностью и равномерно увлажненным. Оптимальные количества увлажняющей жидкости для различных порошков: для титана — 6 % (по массе) воды, для борида титана — 17 % воды, для борида циркония — 12 % воды, для сплава ВК-20 — 10 % раствора глицерина в метаноле.

Повышению плотности изделий при вибрационном формовании способствует введение в порошок инертных (глицерина, масел) и особенно поверхностно-активных смазок (олеиновой кислоты).

Технологическим фактором, определяющим получаемую плотность изделий, является максимальное усилие, развиваемое при каждом колебании. Это усилие зависит от амплитуды колебаний, и с ее увеличением плотность формируемых заготовок повышается. Так как плотность заготовок не зависит от частоты колебаний, то виброформование целесообразно проводить при низких частотах (50—200 Гц), используя для этих целей механические и электромагнитные вибраторы. Следует отметить, что порошки материалов, не поддающихся пластическому деформированию, эффективно уплотняются до определенных амплитуд, величина которых зависит от частоты вибрации. При формовании указанных порошков с большими амплитудами заготовки разрушаются.

При свободном виброформовании порошков наиболее интенсивное уплотнение происходит в первые 3—5 с. Методом свободного виброформования изделия из карбида кремния уплотняются до относительной плотности 67,5%, из карбида хрома — 73%, карбида титана — 84%. При виброформовании порошков твердых сплавов наиболее целесообразно прилагать дополнительно небольшие статические давления к порошку для получения более плотных прессовок. Это по-

звolyет извлекать заготовки из пресс-формы и передавать их на спекание без разрушения.

При вибрационном формовании изделий сложных форм, учитывая невысокую прочность прессовок, применяют такие матрицы, в которых их затем можно спекать.

Вибрационное формование целесообразно сочетать с другими методами формования: изостатическим, формованием в закрытых пресс-формах, импульсным и др.

#### Способы импульсного формования

В зависимости от источника энергии различают взрывное, электрогидравлическое, электромагнитное и пневмомеханическое формование порошков.

При взрывном формовании возможны разные способы создания нагрузки на порошковое тело: передача давления через жидкую среду – гидродинамическое прессование; соударение пуансона с летящим снарядом; непосредственное воздействие ударной волны на пуансон.

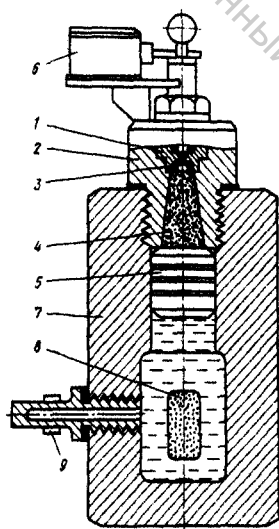


Рис. 3.34. Схема гидродинамической установки

1 – ударный механизм; 2 – резьбовой затвор;  
3 – капсуль-воспламенитель; 4 – пороховой заряд; 5 – поршень; 6 – электромагнит; 7 – корпус; 8 – прессовка; 9 – датчик давления

Наиболее перспективным является гидродинамический метод прессования, который обеспечивает уплотнение порошка в условиях всестороннего сжатия; позволяет получать заготовки сложной формы и с равномерной плотностью.

На рис. 3.34 представлена схема гидродинамической установки. Установка состоит из толстостенного цилиндрического стального корпуса 7, запирающегося резьбовым затвором 2, в котором размещается камера с пороховым зарядом 4 и капсулом-воспламенителем 3.

Воспламенение капсуля осуществляется ударным механизмом 1, который приводится в действие с помощью электромагнита 6. Пороховые газы перемещают поршень 5 вниз и, сжимая воду в рабочей камере, обеспечивают импульсное прессование помещенного в ней порошка 8. Величина импульсного давления фиксируется манганиновым датчиком 9.

Конструктивно гидродинамическая машина напоминает современный гидростат, но, вместо насоса высокого давления и мультипликатора для сжатия жидкости в рабочей камере, используется заряд пороха, при горении которого рабочая жидкость (смесь воды и эмульсола) сжимается разделительным поршнем. Импульсный характер нагружения позволяет отказаться от использования уплотнений для герметизации рабочей камеры.

Исследование технологических факторов гидродинамического прессования и влияния высоких скоростей деформирования на структуру и свойства прессовок позволило установить:

- временное сопротивление брикетов на сжатие выше на 25 - 30 %, а ударная вязкость — на 18 — 25 %, чем у брикетов той же плотности, спрессованных на гидростатах;

- высокие скорости прессования металлических порошков способствуют образованию большого числа чисто металлических связей между частицами за счет интенсивного разрушения оксидных пленок и схватывания при локализации пластической деформации на контактах. Это вызывает заметное повышение микротвердости, микронапряжений и плотности дислокаций, что позволяет активировать процесс последующего спекания и в ряде случаев снизить температуру спекания на 150 -200 °С.

Гидродинамическое прессование порошков керамических материалов обеспечивает более плотную структурную упаковку за счет дробления крупных частиц; позволяет уменьшить влажность сырца и количество технологической связки; позволяет снизить температуру и время сушки, а также усадку и брак в процессе спекания;

Методы гидродинамического прессования успешно применяются для получения заготовок и изделий из порошков с несферической формой частиц. Наиболее широко они используются для прессования титановых фильтров, предназначенных для фильтрации газов и жидкостей, аэрации систем биологической очистки сточных вод и т.д.

Гидродинамическое прессование перспективно для получения изделий металлургической керамики: погружаемых сталеразливочных стаканов длиной до 750 мм из корундографитовых масс, предназначенных для машин непрерывной разливки стали; тиглей из порошковых композиций на основе  $\text{AlN-Si}_3\text{N}_4\text{-BN}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$  и др.

### 3.11. Прокатка порошков

Это непрерывный метод формования, который наиболее распространен в промышленности. Появление и развитие его было обусловлено следующим:

- возможностью изготовления проката с особыми свойствами, присущими только порошковому прокату (пористых листов с регулируемой системой пор);
- коренным упрощением и удешевлением процесса производства беспористого проката с обычными свойствами (из никеля, меди, алюминия и др.);
- возможностью изготовления проката из сплавов труднодеформируемых или недеформируемых в литом состоянии, а также из сплавов, которые нельзя получить плавлением.

Прокаткой порошков можно получить конструкционные, электротехнические, фрикционные и антифрикционные заготовки и изделия, которые применяют при изготовлении фильтров для очистки жидкости, газов, расплавов, электродов электрохимического производства, катализаторов, топливных стержней и др.

По сравнению с имеющимися аналогичными по назначению материалами пористый листовой прокат обеспечивает более высокую степень чистоты материала; обладает повышенной прочностью, пластичностью, термостойкостью; высокой тепло- и электропроводностью. Его свойства легко поддаются регулированию.

Процесс прокатки можно рассматривать как непрерывное прессование, начинающееся в очаге деформации и кончающееся на выходе ленты из зазора между валками. Захват порошка валками происходит за счет контактного трения и внешнего давления. Угол захвата  $\alpha$ , ограничивающий зону прессования порошка, связан с коэффициентом трения  $f$  и коэффициентом бокового давления  $\xi$ . При прокатке в гладких валках условие захвата порошка валками описывается формулой

$$\alpha \leq f + \xi \quad (3.33)$$



Зависимость между толщиной проката и технологическими параметрами при прокатке порошков определяется уравнением

$$h = \alpha^2 R / \mu z^{-1}, \quad (3.34)$$

где  $h$  — толщина ленты;  $R$  — радиус вала;  $\alpha$  — угол захвата;  $\mu$  — коэффициент вытяжки, определяемый как отношение скорости выхода ленты  $V_L$  к скорости подачи порошка в валки  $\mu = V_n/V_L$ ;  $z$  — степень уплотнения, или отношение плотности ленты к насыпной плотности порошка.

Максимально возможная скорость прокатки ограничивается текучестью порошка. Если окружная скорость валков больше скорости поступления порошка в зону между валками, то нарушается прерывность процесса и порошок в сплошную ленту не прокатывается. Порошок поступает в зону деформации преимущественно свободным осыпанием между валками за счет собственной массы. Для осуществления непрерывности процесса прокатки необходимо согласовать линейную скорость движения порошка со скоростью вращения валков.

Плотность прокатанной ленты зависит от плотности порошка, коэффициента вытяжки, радиуса валков, угла захвата, толщины ленты и определяется уравнением

$$\rho_L = \rho_n / \mu \left[ 1 - \left( \alpha^2 R / h \right) \right], \quad (3.35)$$

где  $\rho_n$  — насыпная плотность порошка.

На процесс прокатки порошка оказывает влияние воздух, находящийся в порах между частицами порошка. При прокатке воздух выжимается из пор между частицами порошка в направлении, противоположном направлению подачи порошка. Поток воздуха препятствует поступлению порошка в зону деформирования и, следовательно, оказывает влияние на плотность и толщину прокатываемых лент. Степень влияния зависит от скорости прокатки и вязкости воздуха.

При прокатке порошков изменение раствора валков приводит к изменению плотности сырого проката в соответствии с уравнением

$$\rho_L = 0,5 \left( C^2 / h_L \right), \quad (3.36)$$

где  $\rho_L$  — плотность сырого проката;  $h_L$  — фактическая толщина сырого проката;  $C$  — универсальный коэффициент, характеризующий суммарное действие

всех геометрических и физико-механических параметров процесса прокатки порошков.

Плотность проката уменьшается с увеличением его толщины. Повышению плотности проката можно достигнуть увеличением уровня порошка в зоне формирования; вакуумированием; механической принудительной подачей порошка; повышением шероховатости валков и некоторыми другими способами.

#### Способы прокатки полос и лент

Способы прокатки порошков классифицируются по трем признакам: направлению прокатки, подаче порошка в валки и конфигурации формирующих органов.

По направлению различают *вертикальную, горизонтальную, наклонную и радиусную* прокатку (рис. 3.35).

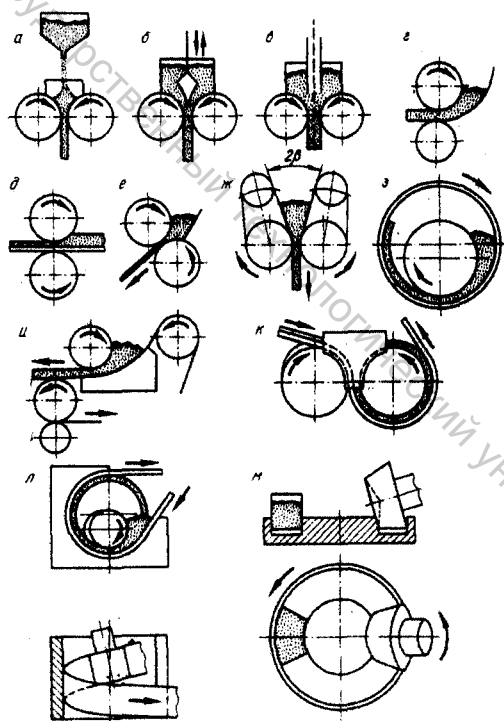


Рис. 3.35. Способы прокатки порошка

При вертикальной прокатке оси валков расположены в горизонтальной плоскости (рис. 3.35, а-в). Гравитационный подпор порошка на оба валка при вертикальной прокатке обеспечивает оптимальные условия захвата и уплотнения порошка. Недостатком вертикальной прокатки является провисание выходящей из валков ленты или необходимость ее изгиба. При прокатке толстых полос и лент из труднодеформируемого материала, прочность которых в неспеченном состоянии незначительна, в результате провисания или изгиба возможны обрывы проката.

При горизонтальной прокатке (рис. 3.35, г, д) оси валков расположены в вертикальной плоскости. Преимущество этого способа — возможность использования обычных прокатных станов без существенной их реконструкции. Недостатком горизонтальной прокатки является снижение подпора порошка в сравнении с вертикальной, в результате уменьшаются толщина и плотность проката.

Наклонная прокатка (рис. 3.35, е) позволяет обеспечить достаточный подпор порошка на валки; уменьшить по сравнению с вертикальной прокаткой нижнюю критическую скорость; уменьшить растягивающие напряжения в прокате.

Радиусная прокатка осуществляется между валком и кольцом (рис. 3.35, з, к, л). За счет односторонней кривизны формирующих органов при радиусной прокатке увеличиваются высота и длина очага уплотнения, что позволяет прокатывать более толстые полосы, чем в валках. Получаемая при радиусной прокатке заготовка имеет кольцеобразную форму, что может быть использовано для производства втулок и спиральных труб.

Различают подачу порошка в валки гравитационную и принудительную, без дозатора и с дозатором. Гравитационная подача наиболее распространена. Осуществляется гравитационная подача из бункерного устройства, на котором может располагаться дозатор (рис. 3.35, а). Для увеличения плотности и толщины ленты применяют принудительную подачу порошка специальным толкателем, совершающим возвратно-поступательное движение (рис. 3.35, б).

С целью интенсификации процесса формообразования подача порошка и прокатка могут осуществляться между двумя подвижными лентами (рис. 3.35, ж) или между одной подвижной лентой и валком (рис. 3.35, и, к, л). Это позволяет увеличить толщину и плотность лент.

При необходимости прокатки двух- или трехслойных лент в бункере устанавливают одну или две перегородки, между которыми загружают разные порош-

ки. Расстояния между перегородками, а также между нижней кромкой перегородок и валками определяют толщину слоев проката.

Прокатка лент с упрочняющей арматурой осуществляется введением в валки сетки (рис. 3.35, в), которая для улучшения сцепления предварительно покрывается металлом, образующим при спекании твердые растворы с основным материалом.

На рис. 3.35, д представлена схема горизонтальной прокатки на подложке. В качестве подложки может использоваться бумага, ткань или металлическая лента. Бумага и ткань упрочняют неспеченную заготовку, а при спекании выгорают. При холодной прокатке на металлической подложке сцепление порошкового слоя с подложкой не происходит. Для получения лент с накатанным слоем порошкового материала к стальной подложке предварительно припекают слой порошка, а затем его уплотняют прокаткой или производят горячую накатку порошка на стальную подложку.

По конфигурации формирующих органов различают прокатку между цилиндрическими валками (рис. 3.35, а-г, е), между валком и кольцом (рис. 3.35, з, и, л) и между валком и плоской поверхностью (рис. 3.35, д, м).

#### *Способы прокатки дискретных заготовок*

В условиях массового и серийного производства тонких плоских заготовок эффективно применение дискретной прокатки (рис. 3.36).

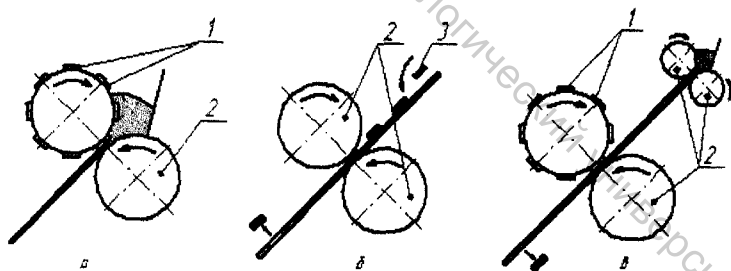


Рис. 3.36. Схемы дискретной прокатки

а – непосредственно из порошка; б – в валках с накладными формирующими элементами; в – с формирующими вставками в валке: 1 – формообразующие вставки; 2, 4 – гладкие валки; 3 – формообразующие накладки

Прокатка осуществляется в валках, один из которых имеет гладкую поверхность, а на поверхности второго валка выполнены выступающие вставки

(рис. 3.36, а). Целесообразно прокатку осуществлять в наклонном направлении. При этом наименьший размер контура заготовки должен быть как минимум на порядок больше ее толщины.

Эффективен и прост в исполнении способ формирования заготовок в валках с помощью накладных формирующих элементов, которые изготавливаются из листовой стали (рис. 3.36, б). Толщину формирующих элементов принимают несколько большей или равной обжатию полосы. Твердость и прочность материала формирующего элемента должны быть достаточными для восприятия давления уплотнения без пластической деформации и не разрушаться при упругом изгибе в процессе уплотнения порошка в валках.

Прокатку полосы и формовку заготовок обычно производят в гладких валках при постоянном зазоре. После прокатки полосы на ее поверхность укладывают формирующие элементы и снова пропускают между валками. Обжатие заготовок при этом приблизительно равно высоте формирующих элементов. Этим способом возможно получение сложных по конфигурации заготовок (рис. 3.37).

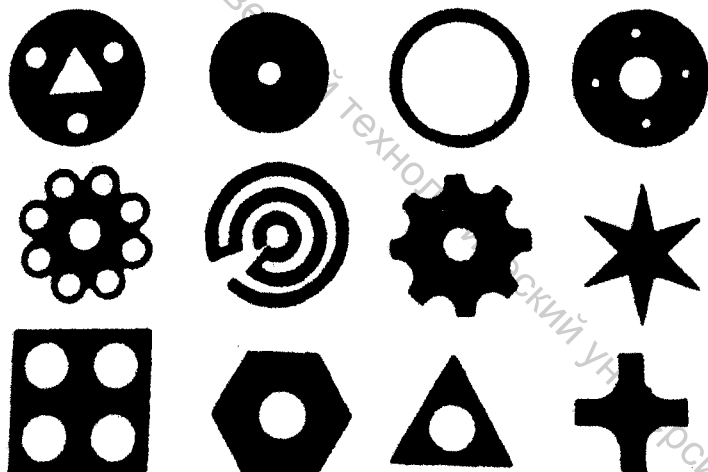


Рис. 3.37. Заготовки, полученные дискретной прокаткой

Дискретная прокатка в двух клетях обеспечивает высокую производительность процесса (рис. 3.36, в). В одной клетке осуществляется прокатка ленты, а в другой – формообразование заготовок. При этом формообразующие вставки стационарно закреплены на одном из валков. Для уменьшения вытяжки дискретных

заготовок диаметр валков второй клетки увеличивают в 1,5-2 раза по сравнению с диаметром валков первой клетки.

Одним из существенных недостатков процесса прокатки порошков является ограничение по толщине. Толщина прокатываемых полос или заготовок не превышает один процент от диаметра валков. Номенклатура прокатанных изделий ограничивается получением плоских полос, лент или штучных заготовок. Практически невозможно получение изделий сложной формы.

### **3.12. Формование заготовок из пластифицированных порошков**

#### *Пластифицирование порошков*

Пластифицирование – одна из самых важных операций при подготовке к прессованию порошковой керамики: карбидов, нитридов, боридов и др. Пластифицирующие вещества, вводимые в смесь перед прессованием, с одной стороны, облегчают скольжение частиц порошка относительно друг друга и стенок пресс-формы, способствуя тем самым уплотнению смеси, а с другой, придают заготовкам некоторую дополнительную прочность за счет клеящей способности пластификатора.

Применяемые пластификаторы должны легко удаляться из заготовки при сушке или низкотемпературном спекании и не оставлять примесей. В качестве пластификаторов применяют парафин, раствор каучука, раствор бакелита, раствор поливинилового спирта, различные глины, жидкое стекло или различные комбинации из них.

Так, при формовании твердых сплавов хорошо зарекомендовал себя пластификатор, включающий озокерит, твердый парафин и парафиновое масло. Применение одного твердого парафина нецелесообразно из-за малого интервала температуры плавления ( $52 - 54^{\circ}\text{C}$ ). Озокерит, имеющий температуру плавления  $70^{\circ}\text{C}$ , при комнатной температуре мягок и при его использовании не требуется нагрева материала и инструмента, а добавки парафина и парафинового масла увеличивают прочность и пластичность смеси.

При подготовке шихты должно быть обеспечено равномерное распределение пластификатора в смеси. Этого можно достигнуть, протирая смесь через сито или пластическим деформированием смеси, например, неоднократным продавливанием ее через многоканальный мундштук с небольшим сечением.

Влажность смеси также имеет большое значение; недостаточно влажные смеси выдавливаются при повышенных давлениях. Оптимальное количество влаги для разных смесей находится в пределах 10 – 16%. Так как органические пластификаторы вносят в формируемое изделие дополнительное количество углерода (до 1,0%), их надо после формования удалять путем сушки или нагрева при невысоких температурах (300 – 500°C). Положительное влияние на качество смесей оказывает сушка в вакууме.

### Мундштучное формование

Процесс мундштучного формования (выдавливания) заключается в том, что пластифицированную шихту или приготовленные из нее брикеты продавливают через отверстие определенного сечения (рис. 3.38). Формообразующий инструмент называется мундштуком. Пресс-форма может быть установлена мундштуком вниз (рис. 3.38, а), если масса выдавливаемого стержня не вызывает его разрыва под действием собственного веса. Для получения тонких (до 1,5 мм) стержней (и длиной не более 40 мм) возможна горизонтальная установка пресс-формы.

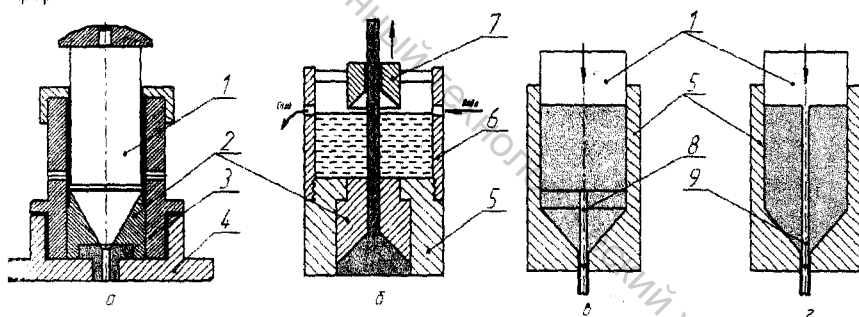


Рис. 3.38. Схемы мундштучного выдавливания стержней (а, б) и труб (в, г)

а – выдавливание стержней вниз; б – выдавливание стержней вверх; в – выдавливание труб с неподвижной иглой; г – выдавливание труб с подвижной иглой: 1 – пуансон; 2 – мундштук; 3 – калибрующая вставка; 4 – зажимная втулка; 5 – контейнер; 6 – ванна; 7 – направляющая; 8 – игла неподвижная; 9 – игла подвижная

Наиболее удобной следует считать установку пресс-формы мундштуком вверх (рис. 3.38, б). В этом случае значительно уменьшается опасность деформации стержня и, главное, возможно ее интенсивное охлаждение непосредственно после выхода из мундштука в процессе передвижения через ванну с водой. Фор-

мование стержней снизу вверх с водяным охлаждением позволяет формировать без заметной деформации стержни с отношением длины к диаметру равным 100 и более.

Для мундштучного формования труб в контейнере устанавливают иглу, проходящую по оси мундштука и формирующую внутреннюю поверхность трубы (рис. 3.38, в). При подвижной игле, закрепляемой на пуансоне (рис. 3.38, г), улучшаются условия обтекания шихтой поверхности иглы, однако точность отверстия заметно снижается из-за малой поперечной жесткости иглы, которая может отклоняться от заданного положения.

При мундштучном выдавливании скорость пуансона согласуется со скоростью выдавливания стержня.

$$V_{\Pi} = V_c \left( \frac{d_c}{D_{\Pi}} \right); \quad (3.37)$$

где  $V_{\Pi}$ ,  $V_c$  – скорости соответственно пуансона и стержня;  $D_{\Pi}$ ,  $d_c$  – диаметры соответственно пуансона и стержня.

При скорости стержня более 2 – 2,5 мм/сек процесс выдавливания становится нестабильным, а на поверхности стержня появляются дефекты в виде разрывов и «задиrow» поверхности.

Другим, наиболее характерным дефектом мундштучного прессования, являются множественные, часто расположенные кольцеобразные трещины (расслоения) стержня в плоскости, перпендикулярной направлению выдавливания. Этот вид брака практически не наблюдается у тонких стержней. Чем толще стержень, тем чаще встречаются трещины, и при диаметре более 5 мм устойчиво получать бездефектные стержни не удается.

Причиной этого является возрастающая с ростом диаметра мундштука разница в скорости истечения массы в центре и у поверхности стержня. Наружный слой стержня тормозится трением о стенки мундштука, поэтому опережающее движение массы по оси сечения создает предпосылки для возникновения растягивающих напряжений в поверхностном слое и, как следствие, образование трещин.

Ситуация кардинально изменяется при использовании вместо циклически перемещающегося пуансона вращающегося шнека. В этом случае процесс становится непрерывным. Передвижение порошка по винтовому каналу сопровождается



ся одновременным уплотнением. В формообразующую полость мундштука 1 (рис. 3.39, а) уплотненный порошок выдавливается по кольцеобразному сечению, наружный диаметр которого равен диаметру цилиндрической части шнека  $D_{\text{ц}}$ , а толщина кольца равна глубине винтового канала  $h$ .

Давление со стороны шнека передается на порошок через периферийные слои, примыкающие к конической поверхности мундштука. При этом контактные силы трения порошка о поверхность мундштука нейтрализуются осевыми силами

со стороны шнека. В результате выравнивается скорость движения периферийных и центральных слоев и уменьшаются растягивающие напряжения между слоями. Это позволяет избежать нарушения целостности материала и расширить диапазон размеров и форм изделий.

Возможно получение качественных прутковых изделий диаметром 100 - 150 мм, т.е. по сравнению с мундштучным прессованием диапазон размеров изделий расширяется в 20...30 раз.

Процесс осуществляется на специализированных экструдерах (рис. 3.39, б), которые включают подающий 1 и прессующий 2 шнеки; системы терморегуляции подающего шнека 3 и мундштука 4. С целью гомогенизации состава пластифицированный порошок продавливается через специальную сетчатую вставку 5. Порошок в процессе передвижения по каналу подающего шнека подвергается вакуумированию. Это позволяет избежать образования в изделии воздушных раковин.

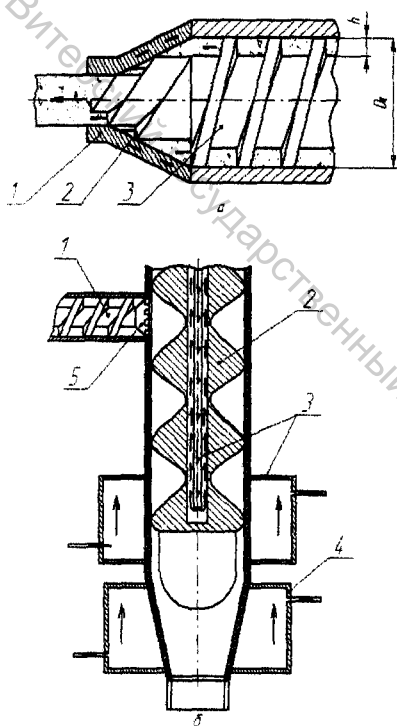


Рис. 3.39. Экструдирование пластифицированных порошков:

а – схема формообразования стержней специальным шнеком: 1 – мундштук; 2 – коническая часть шнека; 3 – цилиндрическая часть шнека; б – схема специализированного экструдера: 1 – подающий шнек; 2 – прессующий шнек; 3 – система терморегуляции шнека; 4 – система терморегуляции мундштука; 5 – сетчатая вставка

### *Литье под давлением (инжекционное формование)*

Технология получения заготовок из порошковых материалов с применением литья под давлением была разработана в развитие процесса мундштучного выдавливания. Сущность формования с помощью литья под давлением заключается в том, что порошковая суспензия впрыскивается (инжектируется) под давлением в литейную форму, из которой осуществляется отсос жидкой составляющей суспензии. Оборудование для инжекционного формования включает резервуар для суспензии с механической мешалкой, насос высокого давления для впрыскивания суспензии в замкнутую полость пресс-формы, устройство для вакуумного отсоса жидкой составляющей суспензии, специализированный гидравлический пресс.

Высокая жидкотекучесть суспензии обеспечивает равномерное заполнение пресс-формы и позволяет получать изделия с весьма тонкими, порядка 20 мкм, отверстиями, чего нельзя достичь традиционными способами формования. Промышленное применение инжекционное формование получило для производства мелких деталей.

### **3.13. Шликерное формование**

Шликерное формование относится к методам формования без приложения давления. Сущность метода заключается в следующем. Из металлического порошка, связывающей жидкости и стабилизирующих добавок готовится жидкая пульпа-шликер. Приготовленный шликер, имеющий определенную консистенцию, вливают в сухую форму из гипса или специального картона, которая имеет геометрию требуемого изделия. Жидкая среда отсасывается через поры формы, а порошковая масса заполняет форму равномерным слоем. После того, как частицы порошковой массы высыхают и прочно сцепляются друг с другом, форму отделяют, а заготовку подвергают окончательной сушке и спеканию. Этим методом можно изготавливать изделия простой и сложной конфигурации (рис. 3.40). Формование производится в адсорбирующих и неадсорбирующих формах.

*Формование в адсорбирующих формах.* Для изготовления форм используют любой материал, который имеет достаточную прочность и способен поглощать жидкую фазу шликера, а также химически инертен к шликеру.



Рис. 3.40. Фасонные детали, изготовленные шликерным формованием

Наиболее полно этим требованиям удовлетворяет гипс; при хранении гипсовые формы защищают от пыли, при этом влажность должна составлять не менее 30 %, а температура не выше 38 °С. Возможна механизация процесса изготовления форм. Заготовки из большинства материалов после формования хорошо отделяются от гипсовых форм. Однако заготовки из порошков карбидов и некоторых металлов плохо или вообще не отделяются от форм. В этом случае на внутреннюю поверхность гипсовой формы наносят антиадгезионную пленку из бумаги, графита, талька, бентонитовой глины, альгинатов натрия или аммония.

Применение гипсовых форм имеет некоторые недостатки, главными из которых являются: относительная недолговечность форм; уменьшение скорости набора массы при повторном использовании форм; затрудненное извлечение из гипсовых форм изделий сложной формы; повреждение рабочих поверхностей формы при чистке после их использования. Поэтому имеются примеры использования форм из других материалов, в частности бумаги, пористой керамики.

Подготовка дисперсной фазы шликера включает операции, обеспечивающие получение порошка оптимального фракционного состава. В качестве жидкой составляющей шликера применяют очищенную воду, а также спирт, четыреххлористый углерод, изобутил уксусной кислоты; для тяжелых металлических порошков применяют более вязкие жидкости, такие как водные растворы альгинатов аммония или натрия, карбоксиметилцеллюлозы, поливинилового спирта. Приго-

товление шликера осуществляют одностадийным или двухстадийным способами. По одностадийному способу предварительно раздробленный материал подвергают мокрому помолу. При двухстадийном способе вначале осуществляют сухой размол, а затем — мокрый с целью получения шликера. При этом образуется твердая фаза с меньшей дисперсностью. В данном случае шликеры имеют большую влажность, а плотность и прочность получаемых заготовок оказываются ниже, чем при одностадийном приготовлении шликера. Ускорение операции сухого измельчения при двухстадийном способе осуществляют добавкой поверхностно активных веществ. Заготовки большой плотности получают путем добавления к шликерам на стадии перемешивания крупнозернистых порошков; этот способ наиболее эффективен при формировании крупногабаритных и толстостенных изделий, так как обеспечивает большую скорость набора массы заготовки и малую их усадку при сушке.

Формование заготовок осуществляют наливанием шликера в гипсовую форму непрерывной струей до ее заполнения (наливной способ); в случае прерывания струи на стенках могут образоваться складки. При сливном способе образование слоя происходит до его определенной толщины, избыток шликера сливают из формы переворачиванием, отсасыванием с помощью шланга или удалением пробки из отверстия в основании формы. Время набора массы на стенке формы составляет 1—60 мин. Для повышения скорости отбора влаги из шликера применяют обдув наружной поверхности гипсовых форм теплым воздухом.

В производственных условиях формование осуществляют на стендах или автоматах. Кроме увеличения производительности, автоматизация позволяет улучшить качество изделий благодаря точной дозировке шликера и быстрому удалению избыточного шликера из формы отсосом после набора массы изделия.

Изделия сушат на воздухе, в сушильных шкафах или сушилках на деревянных подставках. Во избежание растрескивания необходимо осуществлять равномерный нагрев. Оптимальная температура сушки 110—150 °С. В сушильном помещении необходимо поддерживать достаточную влажность. Обжиг или спекание заготовок осуществляют в печах по режимам, зависящим от материала заготовки. Механизм спекания при этом не отличается от механизма спекания формовок, полученных другими методами.

*Формование в неадсорбирующих формах.* Удаление жидкой составляющей из шликера можно осуществить, не прибегая к ее впитыванию материалом

формы. В этом случае удаление осуществляют вакуумированием, избыточным давлением или вымораживанием. При вакуумировании отсос жидкости из шликера проводится через перфорированные стенки в результате разрежения с наружной стороны формы. При избыточном давлении на шликерную массу жидкая составляющая выдавливается наружу через пористые стенки формы. Вымораживание жидкой составляющей производится путем заморозки формы с последующей сублимационной сушкой в вакуумной камере.

Шликерное литье применяют для получения изделий из фаянса, фарфора,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{BeO}$ ,  $\text{ThO}_2$  и др. (тигли, трубки, пластины, лодочки, испарители, чехлы термопар, конструкционные детали для современных двигателей, ядерных реакторов и т. п.). Шликерное формование с успехом применяют для получения изделий из твердых сплавов, керметов и других композитов.

Применение шликерного формования при создании материалов, армированных дискретными волокнами, позволяет распределить волокна и порошок равномерно по объему тела. Этим обеспечивается однородность свойств материала. Получены хорошие результаты на материалах из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$ , армированных волокнами нихрома и коррозионностойкой стали.

Методами шликерного формования получают тонкие пленки из материалов различной природы (например, для изготовления многослойных композиционных материалов или покрытий на различных материалах), а также пеноматериалы из технического глинозема,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiC}$  на связке из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и др.

### **3.14. Спекание**

Спекание – это нагрев и выдержка порошковой заготовки при температуре ниже точки плавления основного компонента с целью обеспечения заданных физико-механических свойств. Спекание представляет сложный комплекс большого количества физико-химических явлений, протекающих одновременно или последовательно при нагревании заготовок. Возможны две разновидности процесса спекания: твердофазное, т.е. без образования жидкой фазы, и жидкофазное, при котором легкоплавкие компоненты смеси порошков расплавляются. Спекание изделий, спрессованных из порошков, проводят в среде защитного газа или вакууме. Применение защитных атмосфер обусловлено необходимостью предохранения спекаемых материалов от окисления в процессе термической обработки, а также восстановления оксидных пленок на поверхности частиц.

Окисление при спекании крайне нежелательно, так как процесс уплотнения и упрочнения спекаемых брикетов тормозится и даже останавливается при образовании на поверхности частиц оксидных пленок. Спекаемые частицы могут окисляться кислородом, содержащимся в защитной атмосфере (например, в виде паров воды), в спекаемом материале в виде оксидов (покрывающих частицы порошков), в порах спекаемого брикета, а также кислородом воздуха, подсасываемого через неплотности печи.

Защиту от окисления особенно трудно осуществить при спекании металлов, образующих трудновосстановимые оксиды (хром, титан, алюминий). При спекании таких металлов требуется тщательная очистка защитного газа от кислорода. Выбор защитной среды в значительной степени зависит от состава спекаемых изделий, типа печей, экономических факторов и т. п. Взаимодействие с атмосферой не должно приводить к образованию соединений, ухудшающих свойства спеченных тел. В целом атмосфера спекания влияет на десорбцию газов; рафинирование, восстановление и диссоциацию оксидов; перенос металла через газовую фазу; образование химических соединений при взаимодействии с материалом спекаемого тела; поверхностную диффузию атомов и др.

В качестве защитной атмосферы при спекании применяют водород, генераторный газ, диссоциированный аммиак, конвертированный природный газ, инертные газы (аргон, гелий), азот, эндо- и экзотермические газы, а также вакуум.

В большинстве случаев применяемые защитные газы перед подачей в рабочее пространство печи очищают от свободного кислорода и углекислоты, а затем осушивают. Для очистки от кислорода газ пропускают через нагреваемую в печи до 200—400 °С трубу, заполненную медной стружкой или пористой губкой, в качестве катализатора реакции взаимодействия кислорода и водорода. В результате примесь кислорода, соединяясь с водородом, превращается в пары воды, которые затем удаляют на стадии осушки газа.

Более высокая степень очистки газа от кислорода достигается пропуском его через нагретый до 900—1000 °С пористый ферромарганец, ферротитан, ферросилиций или титановую губку. Можно пропускать водород через специальный аппарат с палладиевым катализатором, обеспечивающим химическое взаимодействие кислорода с водородом при комнатной температуре; такие стандартные установки имеют производительность 6—60 м<sup>3</sup>/ч.

Важной проблемой является осушка защитных газов. Содержание влаги в газах обычно характеризуют точкой росы или количеством воды в граммах или миллиграммах на  $1 \text{ м}^3$ , а также в объемных процентах.

Пары воды, присутствующие в газе, поглощаются при его прохождении через адсорберы с силикагелем или алюмогелем. В лабораторной практике газ осушивают также пропусканием через хлористый кальций, фосфорный ангидрид и другие вещества, поглощающие влагу.

Для особо высокой осушки, необходимой для спекания, например, хрома и его сплавов, газ пропускают через сосуды с активированным углем, помещенные в жидкий воздух или азот.

При спекании в защитных атмосферах с высокой скоростью нагрева в результате интенсивного выделения газов, адсорбированных порошком, заготовки могут разрушаться. В любом случае десорбция газов оказывает тормозящее воздействие на процесс спекания. Если же прессовки спекать в вакууме, то газы удаляются значительно легче и при более низкой температуре. При этом вакуум не только предохраняет прессовки от взаимодействия с воздухом при спекании, но в то же время способствует восстановлению оксидов, например, под действием примеси углерода, имеющейся в некоторых порошках. Следует также отметить, что при спекании в вакууме легче испаряются летучие примеси, содержащиеся во многих порошках, например магний и хлориды из титана и циркония.

Удаление газов при спекании и восстановление или иногда испарение оксидов качественно изменяют поверхности контакта между частицами, т. е. неметаллические контакты становятся металлическими, что облегчает диффузию атомов металла к поверхности соприкосновения зерен. Наиболее заметно влияние вакуума проявляется при спекании с жидкой фазой. Улучшая смачивание более тугоплавкой составляющей жидкой фазой, вакуум способствует более быстрому уплотнению и повышает равномерность распределения жидкой фазы в спекаемом изделии. Оборудование для проведения спекания в вакууме отличается определенной сложностью, а сам процесс менее производителен по сравнению со спеканием в печах с защитными газовыми атмосферами.

В практике порошковой металлургии часто используют засыпки в качестве защитной среды. Их применяют при укладке спрессованных изделий в поддоны, коробка или лодочки для спекания. В качестве засыпок применяют кварцевый песок, оксид алюминия, графитовую крупку, асбестовую мелочь и др.

Использование титановых сплавов в качестве защитной засыпки предохраняет изделия не только от действия паров воды и кислорода, но и от азота и оксида углерода при условии, если эти газы присутствуют в небольших количествах. Спекаемые брикеты в этих случаях помещают в коробку или лодочку и сверху засыпают порошком легкоокисляющегося материала. Температура плавления засыпки должна быть выше температуры спекания заготовок, кроме того, засыпка не должна взаимодействовать со спекаемым материалом. Состав засыпки выбирают таким образом, чтобы с ее помощью создать в непосредственной близости от спекаемого изделия наиболее благоприятную атмосферу. Чаще всего применяют комбинированные засыпки, состоящие из разнородных компонентов (например, оксида алюминия с добавкой графитовой крупки, оксида алюминия или магния с добавкой хрома, кремния, феррохрома или ферросилиция и т. п.).

Защитные засыпки способствуют также более равномерному прогреву спекаемых изделий и предотвращают их припекание друг к другу.

#### *Брак при спекании и меры его предупреждения*

При проведении спекания появляется не только брак, вызванный нарушением технологии спекания, но и выявляется брак предыдущих операций формования, смешивания и изготовления порошков.

Особые трудности возникают при спекании порошковых композиций с образованием жидкой фазы. При образовании значительных объемов жидкой фазы замыкаются поры или каналы пор, чаще всего в наружных слоях брикета, что затрудняет газовыделение. Такое явление чаще всего наблюдается при слишком быстром подъеме температуры, и оно приводит к образованию пористой сердцевины. Для устранения этого нежелательного явления предусматривают промежуточные выдержки при температуре несколько ниже температуры образования жидкой фазы, что обеспечивает возможность выделения газов из спекаемого брикета.

#### *Наиболее часто встречающиеся виды брака при спекании.*

*Скрытый расслой* — проявление в спеченном изделии трещин, имеющих в прессовке в результате неправильного режима прессования в виде небольших нарушений сплошности, невидимых невооруженным глазом. Брак неисправим.

*Коробление и искажение формы* — нарушение требуемых геометрических форм и размеров изделия. Часто наблюдается в плоских изделиях, толщина кото-



рых незначительна по сравнению с длиной, особенно при изготовлении изделий из мелкодисперсных порошков, имеющих значительную усадку при спекании. Появлению такого вида брака способствует плохое смешивание компонентов шихты, неравномерная плотность прессовки и слишком быстрый подъем температуры при спекании. Этот вид брака при соответствующих условиях может быть исправлен последующей холодной или горячей обработкой давлением. Для его предупреждения применяют спекание прессовок под давлением.

*Пережог* — нарушение нормальной структуры спеченного изделия при превышении заданной температуры спекания. Проявляется в виде растрескивания, чрезмерного заглубления структуры или повышения пористости изделия. Брак неисправим.

*Недопекание* — нарушение требований плотности и прочности спеченного изделия при занижении заданных температуры или времени выдержки при нагреве. Этот вид брака можно исправить повторным спеканием.

*Окисление* — появление на поверхности спеченного изделия цветов побежалости, окалины или коррозии. Это наиболее частый вид брака, связанный с нарушением атмосферных условий спекания (присутствие кислорода или газов, взаимодействующих с материалом спекаемых изделий, подсос воздуха и т. п.). В ряде случаев его можно исправить повторным нагревом в восстановительной атмосфере. Однако при спекании компонентов, образующих трудновосстановимые оксиды, этот вид брака практически неисправим.

*Корочка* — нарушение поверхностного слоя спеченного изделия, выражающееся в изменении его структуры и свойств, например, из-за разложения органических связей, вводимых в шихту для улучшения прессуемости порошков. Брак неисправим. Для предотвращения его появления при спекании применяют медленный и равномерный нагрев изделий, тщательное укрытие их засыпкой и достаточный расход защитной газовой среды.

*Вспучивание* — образование пузырей на поверхности спеченного изделия. Причина — интенсивное газовыделение при жидкофазном спекании, местные перегревы из-за неравномерности нагрева прессовки в печи, вызывающие расплавление компонентов при твердофазном спекании.

*Выпотевание* — выделение жидкой фазы на поверхности спекаемого изделия, например из-за плохой или ухудшающейся смачиваемости жидкой фазой тугоплавкой составляющей материала. Брак неисправим.

*Диффузионная пористость* — пористость, возникающая при спекании материалов, состоящих из компонентов с неодинаковыми коэффициентами диффузии при температуре спекания.

*Обезуглероживание* — уменьшение содержания углерода в поверхностных слоях деталей. Брак связан с повышенным содержанием окислителей, в основном  $H_2O$  и  $CO_2$ , в горячей зоне печи. Как правило, обезуглероживание больше у изделий, находящихся в верхнем слое загрузки в лодочке (поддоне). Для устранения избирательного обезуглероживания верхнего слоя спекаемых изделий лодочки (поддоны) закрывают металлическими или графитовыми крышками, а также применяют защитные засыпки, содержащие углерод. Слабо обезуглероженные материалы можно исправить, спекая их в углеродистой засыпке при минимальном токе водорода.

*Сажистый налет* — образование на поверхности спекаемых деталей темного налета в результате разложения оксида углерода, метана или других углеводородов; может появляться как результат наличия на поверхности деталей тяжелых масел и других материалов, запекающихся с образованием углеродосодержащих налетов.

*Сульфидная пленка* — образование на поверхности спекаемых деталей налета, содержащего соединения серы.

*Разъедание и шероховатость поверхности* — нарушение целостности поверхности спеченного изделия в результате восстановления тех оксидов, которые были на поверхности заготовок до спекания или же образовались при начале их нагрева в печи.

Брак при спекании, особенно неисправимый, существенно ухудшает экономические показатели производства материалов и изделий методом порошковой металлургии. В связи с этим при появлении брака должны быть приняты меры по выяснению причин его возникновения и предложены меры его устранения, в том числе на всех стадиях изготовления изделий, предшествующих спеканию.

### **3.15. Дополнительные технологические операции**

#### *Регулирование структуры*

Структура порошкового изделия определяется его химическим составом и условиями проведения предшествующих технологических операций, прежде всего спекания. От нее существенно зависят многие физико-механические свой-

ства изделий. В связи с этим для различных видов продукции порошковой металлургии в технических условиях или стандартах указывается тип структуры, обязательный для соответствующих порошковых деталей или материалов. Например, при изготовлении антифрикционных железографитовых изделий добиваются получения структуры зернистого перлита с включениями феррита. В этом случае прибегают к отжигу порошковых изделий при 750—800 °С в защитной атмосфере. Отжиг снижает твердость порошкового материала, что облегчает его последующую механическую обработку, повышает стойкость режущего инструмента и обеспечивает стабильность свойств обрабатываемых деталей. Он может быть гомогенизирующим, обеспечивающим выравнивание химического состава по объему изделия. Отжиг бывает необходим при производстве изделий методом горячего прессования, при котором короткие выдержки при температуре процесса часто не обеспечивают однородности структуры и свойств.

Для повышения износостойкости поверхностных слоев применяют науглероживание их карбюризатором или газовой науглероживающей атмосферы, а также азотирование, цианирование и нитроцементацию.

Для порошковых материалов и изделий применимы практически все существующие методы термической обработки (закалка, отпуск и др.), изменяющие их структуру.

#### *Защита от коррозии*

При воздействии агрессивных сред коррозия порошковых изделий развивается весьма интенсивно, особенно при наличии открытой пористости. Поры приводят к объемному развитию коррозии, тогда как компактные материалы корродируют только с поверхности.

Для малопористых деталей в качестве защиты широко применяют электрохимическое осаждение покрытий (хромирование, никелирование, кадмирование). Однако при пористости более 10 % необходимо каким-либо образом закупорить поверхностные поры, так как иначе осаждаемый на поверхности слой будет не плотен. Кроме того, попадание электролита внутрь изделия вызывает дополнительную коррозию частиц порошка. Возможно чисто механическое воздействие на поверхность: деталь шлифуют, а затем полируют, в результате чего образуется уплотненный наружный слой. Часто прибегают к уплотняющему обжатию. Более рационально применить предварительное заполнение пор веще-

ством, не вызывающим коррозии материала. Например, перед электроплакировкой изделие пропитывают смолами или кремнийорганическими жидкостями.

Для обезжиривания пористых изделий применяют органические растворители либо холодные обезжиривающие растворы. Обычно толщина осаждаемого металла составляет 10—15 мкм, а для увеличения ее до 25—30 мкм защитное покрытие наносят два—три раза.

Разработана защита изделий от коррозии пинингованием, при котором на поверхность наносят слой пластичного коррозионностойкого материала (бронзы, латуни, цинка, олова). Порошок защищающего металла вдавливают в поверхность обрабатываемого изделия ударными телами (дробью, стеклянными шариками, обрезками проволоки и др.). Толщина покрытия составляет 3—5 мкм.

Широко применяют оксидирование и фосфатирование поверхности изделий. Оксидный слой образуется при обработке изделий либо в щелочных растворах (воронение), либо перегретым паром. При щелочном оксидировании изделия погружают в раствор едкого натра (700—800 г NaOH на 1 л воды), содержащий нитрат натрия (80—100 г  $\text{NaNO}_3$  на 1 л воды), где их выдерживают в течение 60—90 мин при 130—140 °С. Затем изделия тщательно промывают, сушат и обрабатывают в 9—10 %-ном растворе бихромата калия при 70 °С.

При паротермическом оксидировании изделия предварительно нагревают до 500—600 °С, а затем на них подают пар. После выдержки в течение 60—100 мин их охлаждают в атмосфере пара. Оксидирование улучшает прочностные и антифрикционные свойства изделий. Для повышения стойкости оксидных покрытий применяют пропитку полимерами, например кремнийорганическими жидкостями.

Плотную фосфатную пленку создают, погружая изделия на 40—60 мин в раствор фосфорнокислых солей Mg, Cr и Fe с температурой 96—100 °С. Фосфатная пленка хорошо предохраняет от коррозии.

#### *Пропитка маслом*

Спеченные и термически обработанные пористые втулки, предназначенные для работы в качестве подшипников в узлах трения, подвергают пропитке машинным маслом, которое служит смазкой в процессе эксплуатации. Масло в порах втулки удерживается капиллярными силами. Пропитку наиболее просто

проводить погружением деталей в нагретое масло при 80—120 °С и выдержке 0,5—2 ч с последующим охлаждением в холодном масле. Для более полного заполнения пор пропитку целесообразно проводить в вакууме. В этом случае содержание масла в изделиях увеличивается на 25—27 % по сравнению с обычным методом пропитки, а продолжительность операции сокращается в 8—10 раз. Хорошие результаты достигаются при пропитке с применением ультразвука, который способствует проникновению масла в поры деталей и позволяет вести процесс при комнатной температуре.

### **3.16. Точность изделий, получаемых методами порошковой металлургии**

Точность изготовления порошковых деталей определяется точностью оборудования, пресс-форм, стабильностью упругих последствий, объемных изменений при спекании, износом пресс-форм, ростом линейных размеров при хранении и т. д.

Точность размеров холоднопрессованных брикетов при уплотнении «по давлению» соответствует для размеров по высоте 12—14-му квалитетам, для диаметральных — 6—8-му квалитетам; при уплотнении с ограничителем для высотных размеров соответствует 12-му квалитету, для диаметральных—8—11-му квалитету. Схема прессования «по давлению» обеспечивает более высокую точность диаметральных размеров, а схема прессования с ограничителем — высотных.

При изготовлении изделий с точностью по 6—7-му квалитетам для обеспечения допуска соосности детали пресс-формы изготавливают по 3—6-му квалитетам. В этом случае для изделий диаметром 18, 26 и 45 мм рекомендуются минимальные зазоры между подвижными элементами пресс-форм, мкм: 4—14; 4—18 и 8—26 соответственно.

Спекание приводит к снижению точности размеров на 1—2 квалитета. Точность размеров поперечного сечения прессовок (круглость, соосность) практически не зависит от схемы прессования и определяется в основном точностью пресс-форм.

Для повышения точности пористых конструкционных изделия применяют калибрование путем обжатия в калибровочных пресс-формах. Отклонение диа-

метральных размеров калиброванных изделий от соответствующих размеров матрицы или стержня калибрующей пресс-формы не превышает 5—10 мкм.

### **3.17. Применение порошковых конструкционных изделий**

*Рекомендации по выбору исходного сырья и технологических схем получения деталей конструкционного назначения методами порошковой металлургии:*

1. Структура материалов должна быть равновесной, термически стабильной, обеспечивать заданный уровень механических свойств и безотказную работу изделий в течение всего периода эксплуатации.

2. Малонагруженные детали, находящие наибольшее применение в машиностроении и приборостроении, нецелесообразно изготавливать из легированных порошков (если это не обусловлено необходимостью придать им специальные свойства, например электрические, магнитные или коррозионные). Наиболее целесообразно изготавливать такие детали из железного порошка или шихт на его основе с добавками углерода холодным прессованием пористостью 11-25% и последующим спеканием при  $T > 0,8 T_{пл}$ . Для обеспечения герметичности изделий пропитывают металлическими или неметаллическими расплавами, органическими мономерами с последующей полимеризацией.

3. Умереннонагруженные порошковые детали целесообразно изготавливать из порошков углеродистых или низколегированных сталей пористостью 10—15 % однократным или двойным прессованием и спеканием. Для деталей повышенной сложности при необходимости применяют механическую обработку; для деталей простой и средней сложности — калибрование. В зависимости от условий эксплуатации детали подвергают термической обработке.

4. Средненагруженные детали для работы в условиях значительных статических или небольших динамических нагрузок следует изготавливать из порошков углеродистых или легированных сталей, цветных металлов и сплавов. Пористость материалов не должна превышать 9 %. Изделия для данных условий эксплуатации получают горячей или холодной штамповкой, горячим прессованием или пропиткой металлической тугоплавкой заготовки легкоплавким металлическим расплавом с последующей термической или химико-термической обработкой.

5. Порошковые конструкционные материалы для работы в условиях высоких статических или динамических нагрузок, а также в агрессивных жидких или газовых средах целесообразно изготавливать из однородных порошков легированных сталей или сплавов. Пористость деталей должна быть менее 2%. Изделия получают горячей или холодной штамповкой спеченных порошковых заготовок с последующей термической, химико-термической или термомеханической обработкой.

6. Порошковые материалы с заданными структурно-нечувствительными свойствами (например, коэффициент термического расширения, термоЭДС, температура плавления) можно изготавливать пористыми; значение пористости определяют по уровню действующих удельных нагрузок.

Последовательность операций при получении деталей конструктивного назначения разной серийности, нагруженности и сложности приведена в табл. 3. 2.

#### *Методика подбора номенклатуры*

Методика подбора номенклатуры деталей для изготовления методами порошковой металлургии включает выявление объекта (выявление деталей и узлов с низким сроком службы, из дорогих и дефицитных материалов); классификацию деталей в зависимости от конфигурации, геометрических размеров, режимов и условий эксплуатации; анализ условий работы деталей; предварительный отбор материала для замены; предварительное определение экономической эффективности производства и применения порошковых деталей.

Для выявления объекта (номенклатуры деталей), который можно рекомендовать для изготовления методами порошковой металлургии, необходимо изучить конструктивные особенности и условия работы оборудования; предварительно определить наиболее массовые и быстроизнашивающиеся узлы и детали, а также детали, выполненные из цветных металлов и сплавов; определить общую годовую потребность в указанных деталях. Выявленные детали классифицируют по таким основным признакам: конструкция узла и назначение детали; конфигурация и геометрические размеры; требования к точности размеров и шероховатости поверхности; режимы и условия эксплуатации.

По функциональной роли машины детали принято классифицировать на антифрикционные, конструкционные и специального назначения (магнитные,

электроконтактные, жаропрочные, жаростойкие, коррозионностойкие, проникаемые, со специфическими ядерными свойствами и т. д.). По степени нагруженности детали классифицируются на малонагруженные, умереннонагруженные, средненагруженные и тяжелонагруженные (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Выбор технологического процесса изготовления конструкционных заготовок из порошков

| Степень нагруженности деталей | Квалитет | Группа сложности | Низкосерийное производство        |                         | Среднесерийное и массовое производство |                         |
|-------------------------------|----------|------------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------------------|-------------------------|
|                               |          |                  | Основные технологические операции | Дополнительные операции | Основные технологические операции      | Дополнительные операции |
| Малонагруженные               | 11-14    | 1-7              | А                                 | М, И, П                 | А                                      | К, И, П                 |
|                               | 5-8      | 1-7              | А                                 | М, И, П                 | А, Б                                   | К, И, П                 |
| Умереннонагруженные           | 11-14    | 1-7              | Б, Е, Ж                           | М, ТО, И, П             | Б, Е, Ж                                | И, П                    |
|                               | 5-8      | 1-4              | Б                                 | М, ТО, И, П             | Б                                      | ТО, И, П                |
|                               |          | 5, 7             | Б                                 | ТО, Д, И, П             | Б                                      | ТО, Д, И, П             |
| Средненагруженные             | 11-14    | 1-7              | Г, Е, Ж                           | М, ТО, П                | Г, Е, Ж                                | ТО, П                   |
|                               | 5-8      | 1-7              | В, Г, Ж                           | ТО, Д, П                | В, Г, Ж                                | ТО, Д, П                |
| Тяжелонагруженные             | 11-14    | 1-7              | В, Г, Н                           | М, ТО, П                | В, Г, Н                                | ТО, П                   |
|                               | 5-8      | 1-7              | В, Г, Н                           | ТО, Д, П                | В, Г, Н                                | ТО, Д, П                |

Примечание. А — холодное прессование + спекание; Б — двойное прессование + спекание; Г — холодное прессование + спекание + горячая штамповка + отжиг; В — холодное прессование + спекание + холодная штамповка + отжиг; Н — холодное прессование + спекание + горячая штамповка с истечением металла + отжиг; Е — холодное прессование + пропитка легкоплавким металлом; Ж — спекание порошка в форме + пропитка легкоплавким металлом; К — калибровка; И — пропитка кремнеорганической жидкостью и полимеризация; М — механическая обработка; ТО — термическая обработка; П — нанесение покрытий; Д — шлифовка или доводка.

При отборе деталей для перехода на изготовление методами холодного прессования и последующего спекания или штамповки необходимо следовать рекомендациям: размеры деталей должны находиться в пределах 50—60 мм<sup>2</sup> по сечению и 2—60 мм по высоте; масса деталей не должна превышать 5—10 кг; отношение длины детали к ее диаметру не должно превышать 2,5—3,0; острые углы и грани должны быть закруглены радиусом не менее 0,13 мм; конусность по высоте детали должна быть не более 0,008 мм на каждый миллиметр длины; точность размеров некалиброванных деталей — 8-14 квалитет, калиброванных — 6-7 квалитет.



литет; шероховатость поверхности некалиброванных деталей  $Ra\ 2,5$ - $Ra\ 0,63$ , калиброванных —  $Ra\ 0,32$ - $Ra\ 0,08$ .

При рассмотрении возможности перевода конструкционных деталей на изготовление методами порошковой металлургии необходимо учитывать сложность изготовления пресс-форм; количество и трудоемкость технологических операций; влияние конфигурации детали на ее плотность по объему; возможность применения калибрования для получения требуемой точности. Опыт показывает, что в первую очередь целесообразно переходить на изготовление методами порошковой металлургии детали из цветных металлов и сплавов (простой, средней и сложной групп сложности), стальные и чугунные крупносерийного производства (простой и средней групп сложности).

## 4. ПРОИЗВОДСТВО ЗАГОТОВОК ЛИТЬЕМ

### 4.1. Общие сведения о литейном производстве

Литейное производство – отрасль машиностроения, обеспечивающая получение заготовок (отливок) или деталей заливкой расплавленного металла заданного химического состава в литейную форму, полость которой имеет конфигурации заготовки или детали. При охлаждении залитый металл затвердевает и сохраняет конфигурацию полости формы. Заготовки в дальнейшем подвергают механической обработке.

Литейное производство позволяет получать разнообразные по конфигурации и свойствам фасонные отливки из чугуна, стали и из сплавов цветных металлов массой от нескольких граммов до сотен тонн. Литьем изготавливают отливки как простой, так и сложной формы, которые нельзя получить другими технологическими методами.

Литейное производство в сравнении с обработкой давлением, производством изделий из порошков или сваркой имеет следующие преимущества:

- литьем можно получать заготовки практически любой сложности по конфигурации;
- утилизация отходов металла (литники, брак) в литейном производстве не требует значительных затрат, средств и времени. Отходы нуждаются лишь в переплавке, а полученный металл снова используется непосредственно для изготовления отливок;
- литьем получают заготовки с минимальным припуском на механическую обработку.

В производстве литых заготовок значительное место занимают специальные способы литья: по выплавляемым моделям, в керамические формы, в кокиль, под давлением, центробежное литье и другие, позволяющие получить отливки повышенной точности, с чистой поверхностью, минимальным припуском на обработку, а иногда и полностью исключаящие ее, с высокими служебными свойствами.

Технологические процессы получения отливок этими способами в сравнении с литьем в песчаные формы отличаются меньшими материало- и энергоемкостью, трудозатратами, позволяют существенно улучшить условия труда и снизить вредное воздействие на окружающую среду.

## 4.2. Литейные сплавы и их свойства

Литейные сплавы получают соединением в жидком виде двух или нескольких металлов и неметаллов. По некоторым свойствам (прочность, твердость, способность воспроизводить очертания литейных форм, обрабатываемость режущим инструментом и др.) литейные сплавы превосходят чистые металлы. Важное место в литейном производстве занимают сплавы с особыми физическими свойствами (например, электропроводность, магнитная проницаемость и др.).

Сплавы в зависимости от химического состава отличаются друг от друга температурой плавления, химической активностью, вязкостью в расплавленном состоянии, прочностью, пластичностью и другими свойствами. Для производства фасонных отливок применяют серые высокопрочные, ковкие и другие чугуны; углеродистые и легированные стали; сплавы алюминия, магния, меди, титана и др.

Серый чугун (состав в %: 2,8—3,5 С; 1,8—2,5 Si; 0,5—0,8 Mn; до 0,6 Р и до 0,12 S) имеет достаточно высокую прочность, высокую циклическую вязкость, легко обрабатываем и дешев. Недостатком серого чугуна является низкая ударная вязкость и хрупкость. Прочность серых чугунов обусловлена пластинчатой формой графитовых включений (рис. 4.1, а) и прочностью металлической основы, которая может быть ферритной, перлитной, ферритно-перлитной. Наименьшую прочность имеет ферритная структура, а наибольшую — перлитная. Из серого чугуна изготавливают станины станков, корпуса и крышки редукторов, шкивы и другие отливки.

Высокопрочный чугун (состав в %: 3,2—3,6 С; 1,6—2,9 Si; 0,4—0,9 Mn; не более 0,15 Р; не более 0,02 S; не менее 0,04 Mg) обладает высокой прочностью, пластичностью, хорошо обрабатывается. Высокие механические свойства этих чугунов получают обработкой расплавленного чугуна магнием или церием, при которой графит принимает шаровидную форму (рис. 4.1, б). Из высокопрочного чугуна получают ответственные тяжелонагруженные детали: коленчатые валы, барабаны шахтных вагонеток, шатуны и др.

Ковкий чугун (состав в %: 2,4—2,8 С; 0,8—1,4 Si; менее 1 Mn; не менее 0,2 Р; не менее 0,1 S) по прочности превосходит серые чугуны и имеет высокую пластичность. Получают ковкий чугун при отжиге отливок из белого чугуна (в белом чугуне углерод почти полностью находится в связанном состоянии в виде  $\text{Fe}_3\text{C}$ ) в течение 30—60 ч при температуре 900—1050 °С. При отжиге образуется графит в виде хлопьев (рис. 4.1, в). Ковкий чугун используют для производства

корпусов пневматического инструмента, ступиц, кронштейнов, звеньев цепей и других деталей.

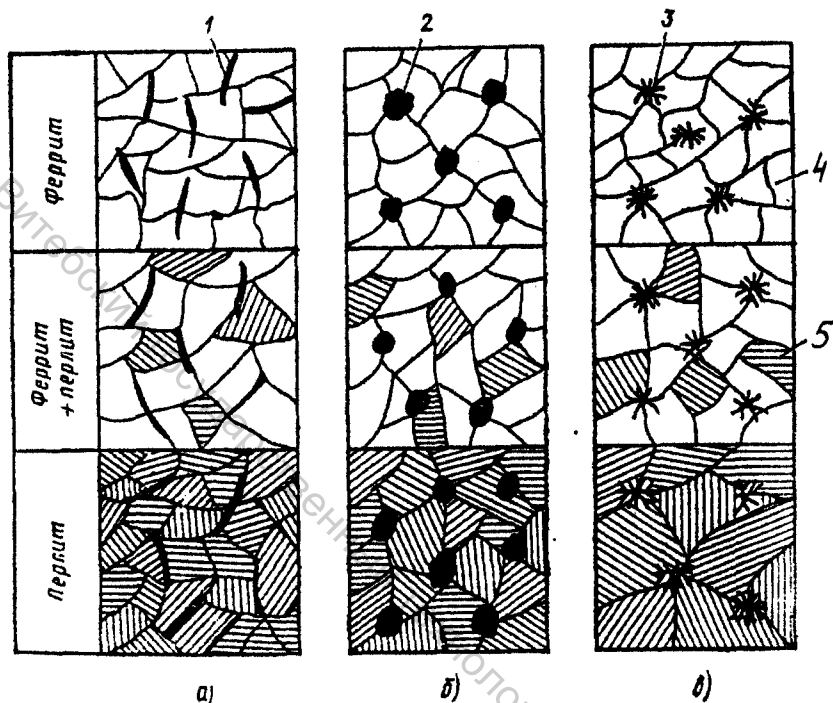


Рис. 4.1. Схемы микроструктур чугуна: а – серого; б – высокопрочного; в – ковкого; 1 – пластинчатый графит; 2 – шаровидный графит; 3 – хлопьевидный графит; 4 – феррит; 5 – перлит

Углеродистые стали (состав в %: 0,12—0,6 C; 0,2—0,5 Si; 0,5—0,8 Mn; до 0,05 P и до 0,05 S) имеют более высокие механические свойства, чем серый и ковкий чугуны. Структура литой стали состоит из перлита и феррита. Чем больше в ней перлита, тем выше прочность и ниже вязкость. Углеродистые стали применяют для изготовления различных цилиндров, станин прокатных станков, зубчатых колес и других изделий.

Легированные стали отличаются от углеродистых составом легирующих, т. е. дополнительно добавленных элементов (хром, никель, молибден, титан и др.) или повышенным содержанием марганца и кремния. Легирующие элементы придают стали высокую коррозионную стойкость, жаропрочность и другие специ-

альные свойства. Из легированных сталей получают турбинные лопатки, коллекторы выхлопных систем, различную арматуру и прочие подобные детали.

Алюминиевые сплавы обладают малой плотностью, высокой прочностью и пластичностью; их легко обрабатывать. Наиболее распространены сплавы алюминия с кремнием (силумины), которые обладают повышенной коррозионной стойкостью, хорошей свариваемостью и другими свойствами. Алюминиевые сплавы применяют при производстве блоков цилиндров, корпусов приборов и инструментов и т. п.

Магниеые сплавы обладают малой плотностью, высокой прочностью, хорошей обрабатываемостью. Недостатком магниевых сплавов является низкая коррозионная стойкость. Для повышения механических свойств практически все магниевые сплавы обрабатывают (модифицируют) гексахлорэтаном, мелом и другими веществами. Из магниевых сплавов изготавливают корпуса насосов, приборов и инструментов и другие детали.

Медные сплавы (бронзы и латуни) имеют сравнительно высокие механические и антифрикционные свойства, высокую коррозионную стойкость, хорошую обрабатываемость. Для изготовления отливок применяют оловянные и безоловянные бронзы и латуни. Безоловянные бронзы используют как заменители оловянных бронз. По механическим, коррозионным и антифрикционным свойствам безоловянные бронзы превосходят оловянистые. Медные сплавы применяют при производстве арматуры, подшипников, гребных винтов, зубчатых колес и др.

*Приготовление литейных сплавов.* Литейные сплавы получают в процессе плавления различных материалов. При плавлении твердые кристаллические тела теряют постоянство формы, объема, а также изменяются их физические свойства. Для получения заданного химического состава и определенных свойств в сплав при приготовлении вводят в жидком или в твердом состоянии специальные (легирующие) элементы, в качестве которых используют Cu, Ni, Mn, Ti, Mg, Mo и др.

Для размельчения структурных составляющих и равномерного их распределения по всему объему литого металла в сплавы вводят малые добавки различных элементов (модификаторов), в качестве которых используют Na, Zn, Mg, Ti, Zr и другие элементы.

Для выплавления чугуна и стали в качестве исходных материалов (шихты) используют литейные или переделные доменные чугуны, чугунный и стальной

лом, отходы собственного производства и ферросплавы. Для понижения температуры плавления образующихся шлаков используют флюсы — известняк, доломит и др.

Для плавки цветных сплавов используют как первичные (полученные на металлургических заводах), так и вторичные (после переплавки цветного лома) металлы и сплавы, кроме того, применяют лигатуры (специально приготовленные сплавы из двух или нескольких металлов) и флюсы (обычно хлористые и фтористые соли щелочных и щелочноземельных металлов).

Для плавления стали и чугуна широко применяют индукционные высокочастотные печи (рис. 4.2, а), позволяющие нагревать металл до высокой температуры; регулировать состав газовой атмосферы; создавать вакуум для получения металла высокого качества с минимальными затратами. Для размещения расплава 1 предназначен тигель 2, выполненный из кварца или магнезита. Нагрев производится при помощи медного или алюминиевого водоохлаждаемого индуктора 3. При пропускании тока высокой частоты через индуктор в шихте, загруженной в тигель, наводятся вихревые токи; выделяется большое количество теплоты, расплавляющей шихту и нагревающей расплав до нужной температуры.

Для плавления цветных сплавов широко применяют электрические печи сопротивления (рис. 4.2, б) и др. Электрическая печь сопротивления выполнена в виде сварного цилиндрического кожуха 3, облицованного (футерованного) шамотным кирпичом 4. Между кожухом и футеровкой предусмотрена теплоизоляционная набивка 5 из легковесных материалов и асбестовых листов. В качестве нагревателей 6 используют нихромовые спирали. Сплав готовят в литом тигеле 2 из жаропрочного чугуна. Сверху печь закрывается крышкой 1.

*Литейные свойства сплавов.* Не все сплавы в одинаковой степени пригодны для изготовления фасонных отливок. Из одних сплавов (серого чугуна, силумина) можно легко изготовить отливку сложной конфигурации, а из других (титановых сплавов, легированных сталей и др.) получение отливок сопряжено с определенными трудностями. Получение качественных отливок без раковин, трещин и других дефектов зависит от литейных свойств сплавов. К основным литейным свойствам сплавов относят: жидкотекучесть, усадку сплавов, склонность к образованию трещин, газопоглощение и ликвацию.

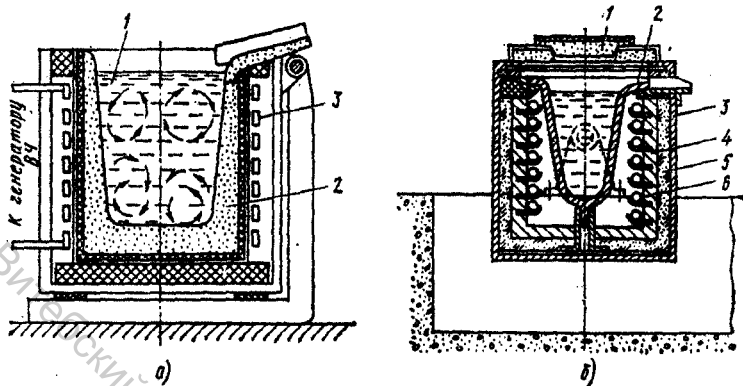


Рис. 4.2. Схемы устройства плавильных печей: а – индукционной высокочастотной; б – сопротивления

1 – расплав; 2 – тигель; 3 – индуктор

1 – крышка; 2 – тигель; 3 – кожух; 4 – кирпич; 5 – набивка; 6 – нагреватель

**Жидкотекучесть** — способность расплавленного металла течь по каналам литейной формы, заполнять ее полости и четко воспроизводить контуры отливки. При высокой жидкотекучести литейные сплавы заполняют все элементы литейной формы, при низкой — полость формы заполняется частично, в узких сечениях образуются недоливы. Жидкотекучесть сплавов определяют по специальным пробам. За меру жидкотекучести принимают длину заполненной спирали в литейной форме.

Жидкотекучесть сплавов зависит от многих факторов; например, повышение температуры заливки увеличивает жидкотекучесть всех сплавов. Чем выше теплопроводность материала формы, тем быстрее отводится тепло от залитого металла, тем ниже жидкотекучесть. Неметаллические включения снижают жидкотекучесть сплавов. На жидкотекучесть влияет химический состав сплавов; с увеличением в исходном материале содержания серы, кислорода и хрома жидкотекучесть снижается, а с повышением содержания фосфора, кремния, алюминия и углерода — увеличивается.

В зависимости от жидкотекучести сплава выбирают минимальную толщину стенок отливок. Например, при изготовлении мелких отливок из серого чугуна в песчаных формах минимальная толщина стенок составляет 3—4 мм, для средних — 8—10 мм, а для крупных — 12—15 мм; для стальных отливок — 5—7, 10—12, 15—20 мм соответственно.

Усадка — процесс уменьшения объема отливки при охлаждении, начиная с некоторой температуры жидкого металла в литейной форме до температуры окружающей среды. Усадка протекает в жидком состоянии, при затвердевании в процессе кристаллизации и в твердом состоянии. Различают линейную и объемную усадки, которые определяют в процентах. Величина усадки сплавов зависит от их химического состава, температуры заливки, конфигурации отливки и других факторов. Наименьшую линейную усадку имеют серый чугун (0,9—1,3%), алюминиевые сплавы — силумины (0,9—1,3%). Стали и некоторые сплавы имеют усадку 1,8—2,5%. Изготавливать отливки из сплавов с повышенной усадкой сложно, так как в массивных частях отливки образуются усадочные раковины и усадочная пористость. Для предупреждения образования усадочных раковин предусматривают установку приливов, т.е. дополнительных резервуаров с расплавленным металлом для питания отливок в процессе их затвердевания.

Напряжения в отливках возникают вследствие неравномерного их охлаждения и механического торможения усадки. Они характерны для отливок с различной толщиной стенок. При затвердевании температура отливки в массивных частях выше, чем снаружи или в тонких сечениях. Поэтому усадка в отдельных местах по величине различна, но так как части одной и той же отливки не могут изменять свои размеры независимо друг от друга, то в ней возникают напряжения, которые могут вызывать образование трещин или коробление. Для предупреждения образования больших напряжений и трещин необходимо в конструкции литой детали предусматривать равномерную толщину стенок; плавные переходы и устранять элементы, затрудняющие усадку сплава, а также использовать литейные формы и стержни повышенной податливости. Трещины довольно часто образуются в отливках из углеродистых и легированных сталей, сплавов магния и многих алюминиевых сплавов.

*Газопоглощение* - способность литейных сплавов в расплавленном состоянии растворять водород, азот, кислород и другие газы. Степень растворимости газов зависит от состояния сплава: с повышением температуры твердого сплава она увеличивается незначительно, несколько возрастает при плавлении и резко повышается при перегреве расплава. При затвердевании и последующем охлаждении растворимость газов уменьшается, и в результате их выделения в отливке могут образоваться газовые раковины и поры. Растворимость газов зависит от химического состава сплава, температуры заливки, вязкости сплава и



свойств литейной формы. Для уменьшения газонасыщенности сплавов применяют плавление в вакууме или в среде инертных газов и другие методы.

**Ликвация** — неоднородность химического состава в различных частях отливки. Различают ликвации зональную и дендритную (внутризеренную). Зональная ликвация — это химическая неоднородность в объеме всей затвердевшей литой детали. Дендритная ликвация — химическая неоднородность в пределах одного зерна (дендрита) сплава. Ликвация зависит от химического состава сплава, конфигурации отливки, скорости охлаждения и других факторов.

#### **4.3. Литье в песчаные формы**

Сущность способа литья в *песчаные формы* заключается в получении отливок из расплавленного металла, затвердевшего в формах, изготовленных из формовочных смесей путем уплотнения с использованием модельного комплекта. После затвердевания залитого металла и охлаждения отливки производят ее выбивку, очистку и обрубку.

Литейная форма (рис. 4.3, а) представляет собой систему элементов, образующих рабочую полость, в которую заливают расплавленный металл. Литейная форма обычно состоит из верхней 2 и нижней 1 полуформ, которые изготавливают в литейных опоках 7 — приспособлениях для удержания формовочной смеси. Верхнюю и нижнюю полуформы взаимно ориентируют при помощи металлических штырей 4, которые вставляют в отверстия приливов у опок. Для образования полостей, отверстий или иных сложных контуров в формы устанавливают литейные стержни 3, которые фиксируют при помощи выступов, входящих в соответствующие впадины в полости формы. Для подвода расплавленного металла в полость литейной формы, обеспечения ее заполнения и питания отливки при затвердевании изготавливают литниковую систему 5 и 6.

Формовочные и стержневые смеси используют для изготовления литейных форм. В качестве исходных формовочных материалов используют формовочный кварцевый песок различной зернистости; литейные формовочные глины и вспомогательные материалы (мазут, графит, тальк, древесную муку и др.). Формовочные смеси представляют собой многокомпонентное сочетание материалов, соответствующее условиям технологического процесса изготовления литейных форм. Их подразделяют на смеси для стальных, чугунных и цветных сплавов. Для изготовления отливок используют облицовочные, наполнительные и единые смеси.

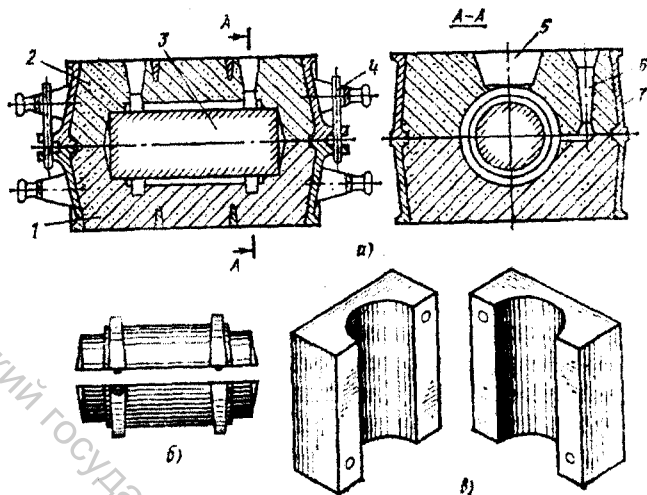


Рис. 4.3. Эскизы литейной формы и модельной оснастки: а – литейной формы; б – модели; в – стержневого ящика:

1 – нижняя полуформа; 2 – верхняя полуформа; 3 – литейный стержень; 4 – штырь; 6, 6 – литниковая система; 7 – литейная опока

Облицовочной называют смесь, из которой изготовляют рабочий слой формы. Рабочим называют слой, соприкасающийся с расплавленным металлом, и его наносят на литейную модель слоем толщиной 15—30 мм. Такая смесь содержит 50—90% свежих формовочных материалов, а остальные 50—10% — обратная смесь, подготовленная для повторного употребления в качестве составляющей части формовочной смеси. Наполнительной называют смесь, используемую для заполнения формы после нанесения на поверхность модели облицовочного слоя. В состав наполнительной смеси обычно входит 90—98% оборотной смеси и 2—10% свежих формовочных материалов. Единой называют смесь, используемую одновременно в качестве облицовочной и наполнительной смесей. В состав этой смеси входит 85—90% оборотной смеси и 15—10% свежих формовочных материалов. Единую смесь используют при механизированном производстве отливок.

Стержневые смеси представляют собой многокомпонентное сочетание материалов, соответствующих условиям технологического процесса изготовления неметаллических литейных стержней. Стержневые смеси для сложных стержней готовят из кварцевого песка с добавкой различных связующих материалов

(олифы, сульфитно-спиртовой барды, синтетических смол и др.). Для простых крупных стержней используют кварцевый песок с добавкой глины. Чтобы стержень не пригорал к отливке, в смесь вводят уголь, графит, мазут, а для обеспечения податливости стержней — древесные опилки и торф.

Широко применяют жидкие самотвердеющие смеси, обладающие способностью течь после приготовления и самопроизвольно отвердевать и упрочняться по всему объему. Такие смеси в течение 8—12 мин. после приготовления обладают подвижностью и через 30—50 мин. после заполнения стержневого ящика за твердевают. Формовочные и стержневые смеси должны обладать достаточной прочностью, высокой газопроницаемостью, пластичностью, достаточной огнеупорностью и податливостью, пониженной газотворной способностью и другими свойствами.

При приготовлении формовочных и стержневых смесей сушат и просеивают кварцевые пески и формовочные глины, удаляют брызги металла и каркасы стержней из отработанной смеси, перемешивают составляющие в специальных смесителях с последующим вылеживанием в отстойниках для равномерного распределения влаги и последующего разрыхления.

Для образования рабочей полости литейной формы используют модельный комплект — приспособления, включающие литейную модель, стержневые ящики (один или несколько), модельные плиты, модели литниковой системы. Литейная модель (рис. 4.3,б) — приспособление, при помощи которого в литейной форме получают отпечаток, соответствующий конфигурации и размерам отливки. Модели бывают неразъемные, разъемные и специальные. Стержни нужных размеров и форм получают в стержневых ящиках (рис. 4.3,в). Рабочая полость ящика заполняется стержневой смесью. Стержневые ящики бывают неразъемные и разъемные. Модельная плита позволяет оформить разъем литейной формы. На ней располагают различные части модели, включая модели литниковой системы, и набивают одну из парных опок.

Каналы и элементы б (рис. 4.3,а), служащие для подвода расплавленного металла, называют литниковой системой, которая также питает отливки при за твердевании. Она состоит из литниковой чаши для приемки расплавленного металла и подачи его в форму; стояка в виде вертикального или наклонного канала для подачи металла из литниковой чаши непосредственно в рабочую полость формы или к другим элементам системы; шлакоуловителя для удержания шлака и других неметаллических примесей и питателя, через который расплавленный

металл подводится в полость литейной формы. Для вывода газов, контроля заполнения формы расплавленным металлом и питания отливки при ее затвердевании служит выпор 5, который выполняют в верхней полуформе.

Изготовление литейных форм — формовка — сводится к уплотнению формовочной смеси для получения точного отпечатка модели в форме и придания ей необходимой прочности. В форме предусматривают вентиляционные каналы для выхода газов, образующихся при заливке расплавленного металла. После извлечения модели форму отделяют и производят сборку опоки. В зависимости от заливаемого металла, размеров и массы отливки применяют сырые, сухие и химически твердеющие формы, которые изготавливают вручную, на формовочных машинах и на автоматических линиях формовки.

Ручную формовку применяют в единичном и мелкосерийном производстве при изготовлении крупных отливок. В большинстве случаев песчаные разовые формы изготавливают в парных опоках по разъёмной модели. Последовательность выполнения основных технологических операций формовки в парных опоках показана на рис. 4.4. Кроме того, в парных опоках производят формовку по неразъёмной модели. Для крупных отливок массой в несколько десятков тонн формы изготавливают в специальных ямах (кессонах), дно которых находится ниже уровня пола цеха. Стенки и дно кессона, как правило, облицовывают бетоном или железобетоном.

Машинная формовка — основной метод изготовления литейных форм в парных опоках — осуществляется по модельным плитам. Машинная формовка позволяет механизировать уплотнение формовочной смеси в опоках и удаление модели из формы (самые трудоемкие операции), а также произвести вспомогательные операции: поворот полуформ, устройство литниковых систем и др. При машинной формовке улучшается качество уплотнения форм, повышаются точность геометрических размеров отливок и производительность. Уплотнение формовочной смеси производят на встряхивающих и прессовых машинах, а также с помощью пескомата.

При уплотнении форм на встряхивающих машинах (рис. 4.5, а) стол 2 вместе с модельной плитой 3, опокой 4 и формовочной смесью поднимается сжатым воздухом на высоту 60—80 мм, а затем автоматически происходит выпуск воздуха из полости цилиндра в атмосферу, и стол падает, ударяясь о станину 1. Под действием сил инерции лежащие выше слои давят на лежащие ниже, и происходит уплотнение формовочной смеси. Встряхиванием можно уплотнять формовочную смесь в опоках любой высоты.

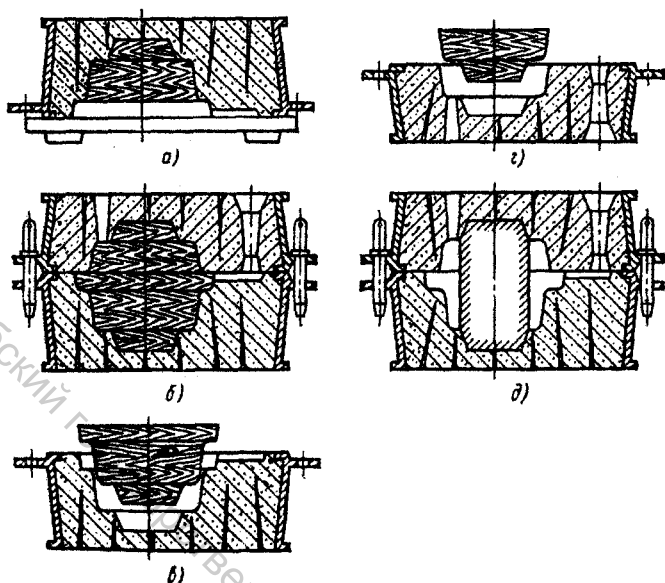


Рис. 4.4. Последовательность операций формовки в парных опоках:

а – изготовление нижней полуформы; б – изготовление верхней полуформы; в – извлечение моделей из нижней полуформы; г – извлечение моделей из верхней полуформы; д – сборка формы

При уплотнении прессованием (рис. 4.5, б) прессовая колодка 1 давит на поверхность смеси, находящейся в опоке 3 и наполнительной рамке 2. В процессе прессования стол 5 поднимается вместе с модельной плитой 4, опокой и наполнительной рамкой навстречу прессовой колодке 1, которая входит внутрь наполнительной рамки. В результате прессования частицы смеси сближаются и прочно сцепляются между собой.

При уплотнении пескометом (рис. 4.5 в) формовочная смесь подается ленточным конвейером 2 в головку 1 и захватывается смесь ковшом 3, укрепленным на вращающемся роторе 4. Формовочная смесь ковшом выбрасывается в опоку 5. Уплотнение формовочной смеси происходит при помощи кинетической энергии движения порции смеси при падении ее на поверхность уплотняемой формы.

Извлечение моделей из форм при машинной формовке осуществляют с помощью специальных вытяжных и поворотных механизмов, что способствует получению более точных отливок.

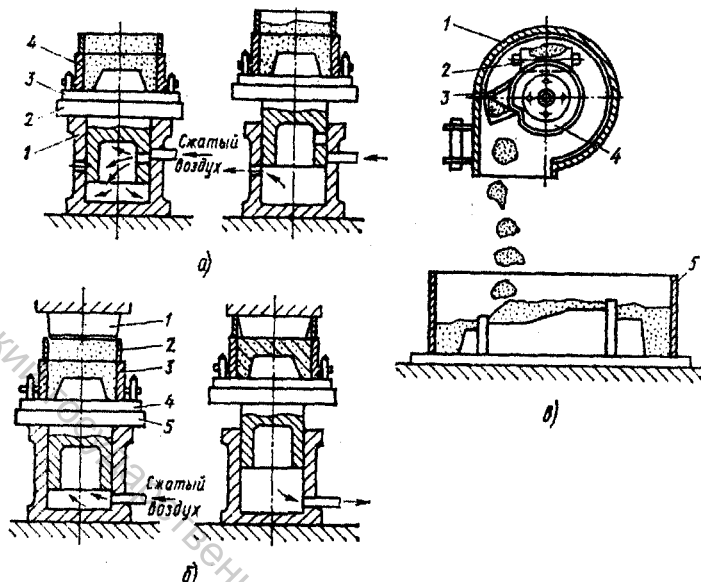


Рис. 4.5. Схемы уплотнения формовочной смеси:

**а** — встряхиванием: 1 — станина; 2 — стол; 3 — плита; 4 — опока;

**б** — прессованием: 1 — колодка; 2 — рамка; 3 — опока; 4 — плита; 5 — стол;

**в** — пескометом: 1 — головка; 2 — конвейер; 3 — ковш; 4 — ротор

Изготовление стержней заключается в формовании сырых стержней, их сушке, отделке и окраске. Для повышения прочности стержней в них закладывают каркасы, а для увеличения их газопроницаемости в них делают вентиляционные каналы. Сушку стержней производят на металлических сушильных плитах при температуре 200—280 °С в течение 2—12 ч. Изготавливают стержни в большинстве случаев на различных стержневых машинах: встряхивающих, прессовых и пескодувных, а также на установках с использованием жидкоподвижных самотвердеющих смесей.

Сборка литейных форм включает установку стержней, контроль точности размеров основных полостей формы, накрывание нижней полуформы верхней, скрепление полуформ перед заливкой.

Заливают формы расплавленным металлом из конических, барабанных и других ковшей, футерованных огнеупорным материалом и высушенных до полного удаления влаги. Температура заливки металла зависит от рода сплава, толщи-

ны стенок отливок, их конфигурации и т. п. Заливку форм ведут без перерыва, с полным заполнением литниковой чаши.

После заливки и охлаждения металла отливки выбивают из форм на вибрационных решетках и очищают от приставшей или пригоревшей формовочной смеси в очистных барабанах или дробеметных устройствах камерного или барабанного типа. При очистке в дробеметных устройствах отливки подвергаются ударному воздействию струи металлической дробы, выбрасываемой дробеметным колесом со скоростью до 70 м/с. Обрубку и зачистку отливок от остатков питателей, заусенцев и заливок производят абразивными кругами или на обрезных прессах.

Для изготовления стальных отливок формовочную смесь готовят из высокоогнеупорных материалов с низкой влажностью. Поверхности литейных форм и стержней покрывают огнеупорными красками. Для уменьшения напряжений в отливках при охлаждении увеличивают податливость форм и стержней. Литниковая система должна обеспечивать спокойное заполнение формы, направленное затвердевание отливки и не препятствовать усадке. Для предупреждения усадочных раковин предусматривают установку прибылей — специальных питателей, в которых металл затвердевает в последнюю очередь, поэтому усадочная раковина образуется в прибыли, а не в отливке.

Механизация и автоматизация процессов литья в песчаные формы заменяет ручной труд машинным, повышает производительность труда, улучшает качество отливок. Для изготовления литейных форм используют различные высокопроизводительные автоматические машины и автоматические линии.

Например, при изготовлении мелких (от 0,1 до 3 кг) отливок широко используют автоматические линии для безопочной формовки (рис. 4.6). Формовочная смесь (рис. 4.6, а) из бункера 2 сжатым воздухом перемещается в полость между поворотной плитой 1 и подвижной модельной плитой 3. Уплотняется формовочная смесь в результате перемещения модельной плиты 3 штоком 4. После уплотнения формовочной смеси поворотная модельная плита 1 отодвигается (рис. 4.6, б) специальным устройством. Модель извлекается и поднимается вверх, а готовая часть формы 5 штоком передвигается и плотно прижимается к ранее изготовленному (рис. 4.6, в). Шток 4 с подвижной плитой возвращается (рис. 4.6, г) в исходное положение.

После этого все операции по изготовлению литейных форм повторяются. Производительность такой автоматической установки до 240 форм в час.

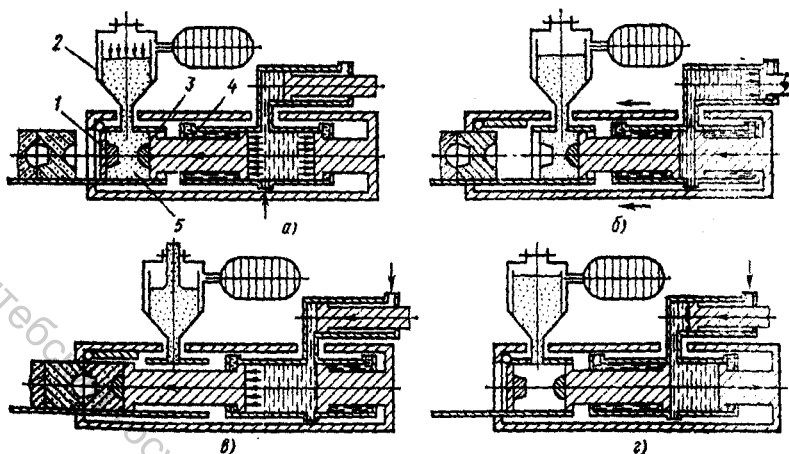


Рис. 4.6. Схема работы автоматической линии для безопочной формовки:

а – вдув смеси и прессование; б – протяжка левой полумодели; в – проталкивание формы вперед;  
г – возврат прессовой плиты и закрывание камеры;

1 – поворотная плита; 2 – бункер; 3 – подвижная модельная плита; 4 – шток; 5 – форма

В производстве широко применяют автоматические заливочные установки. Для создания хороших условий труда и повышения эффективности в литейных цехах применяют комплексную механизацию выбивки форм, очистки, обрубки и предварительной окраски отливки.

#### 4.4. Литье по выплавляемым моделям

Сущность литья по выплавляемым моделям заключается в использовании точной неразъемной разовой модели, по которой из жидких формовочных смесей изготавливается неразъемная керамическая оболочковая форма; перед заливкой расплава модель удаляется из формы выплавлением, выжиганием, растворением или испарением; для удаления остатков модели и упрочнения форма может быть нагрета до высоких температур, что улучшает ее заполняемость расплавом.

*Основные операции технологического процесса.* Модель или звено моделей 2 изготавливают в разъемной пресс-форме 1, рабочая полость которой имеет конфигурацию отливки с припусками на усадку и обработку резанием (рис. 4.7, а). Модель изготавливают из материалов, имеющих невысокую температуру плавления (воск, стеарин, парафин), способных растворяться (карбамид) или сгорать без образования твердых остатков (полистирол). Готовые модели или звенья моделей собирают в блоки 3 (рис. 4.7, б), имеющие модели элементов литниковой системы



из того же материала, что и модель. Блок моделей состоит из звеньев, центральная часть которых образует модели питателей и стояка. Модели чаши и нижней части стояка изготовляют отдельно и устанавливают в блок при его сборке. Блок моделей погружают в емкость с жидкой формовочной смесью — суспензией для оболочковых форм, состоящей из пылевидного огнеупорного материала, например кварца или электрокорунда, и связующего (рис. 4.7, в). В результате на поверхности модели образуется тонкий (менее 1 мм) слой 4 суспензии. Для упрочнения этого слоя, увеличения его толщины на него наносят слои огнеупорного зернистого материала 5 (мелкий кварцевый песок, электрокорунд, зернистый шамот) (рис. 4.7, г). Операции нанесения суспензии и обсыпки повторяют до получения на модели оболочки требуемой толщины (3—10 слоев).

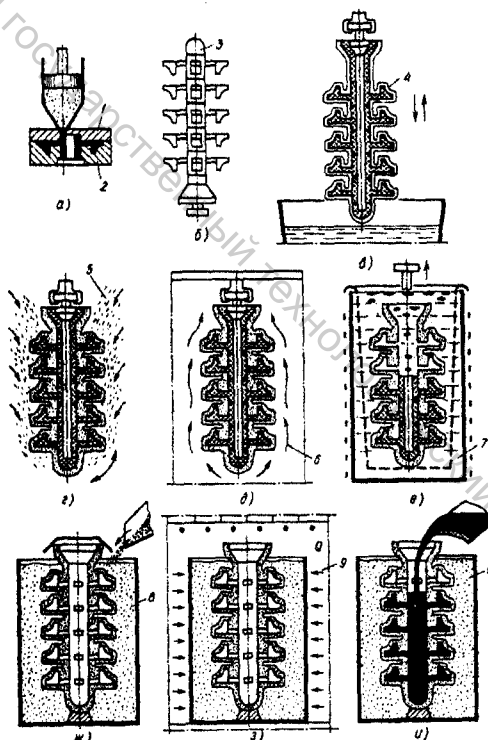


Рис. 4.7. Последовательность изготовления многослойной оболочковой формы по выплавляемым моделям:

- — изготовление модели; б — сборка блока; в — погружение блока в жидкую смесь; г — обсыпка; д — сушка; е — уплотнение модели; ж — засыпка; з — прокаливание; и — заливка
- 1 — пресс-форма; 2 — модель; 3 — блок моделей; 4 — оболочка; 5 — огнеупорный материал; 6 — воздушный поток; 7 — вода; 8 — наполнитель; 9 — печь; 10 — прокаленная форма

Каждый слой покрытия высушивают на воздухе или в парах аммиака 6, что зависит от связующего (рис. 4.7, д). После сушки оболочковой формы модель удаляют из нее выплавлением, растворением, выжиганием или испарением. На рис. 4.7, е показан процесс удаления выплавляемой модели в кипящей воде 7. Так получают многослойную оболочковую форму по выплавляемой модели. Для упрочнения перед заливкой оболочковую форму помещают в металлический контейнер и засыпают огнеупорным материалом 8 (кварцевым песком, мелким боем использованных оболочковых форм) (рис. 4.7, ж).

Для удаления остатков моделей из формы и упрочнения связующего контейнер с оболочковой формой помещают в печь 9 для прокаливания (рис. 4.7, з). Форму прокаливают при температуре  $1223\text{—}1273^{\circ}\text{К}$ . Прокаленную форму 10 извлекают из печи и заливают расплавом (рис. 4.7, и). После затвердевания и охлаждения отливки до заданной температуры форму выбивают, отливки очищают от остатков керамики и отрезают от них литники.

Во многих случаях оболочки прокаливают в печи до засыпки огнеупорным материалом, а затем для упрочнения их засыпают предварительно нагретым огнеупорным материалом. Это позволяет сократить продолжительность прокаливания формы перед заливкой.

Малая шероховатость поверхности формы при достаточно высокой огнеупорности и химической инертности материала позволяет получать отливки с поверхностью высокого качества.

После очистки отливок от остатков оболочковой формы шероховатость их поверхности характеризуется величиной  $Rz = 40\text{—}10\text{ мкм}$ , а в отдельных случаях достигает  $Ra = 2,5\text{ мкм}$ .

Отсутствие операций разъема моделей и формы; использование для изготовления моделей материалов, позволяющих не разбирать форму при удалении модели; высокая огнеупорность материалов формы, нагрев ее до высоких температур перед заливкой, что улучшает заполняемость, дают возможность получить отливки сложнейшей конфигурации, максимально приближающиеся к конфигурации готовой детали практически из любых сплавов. Коэффициент точности отливок по массе может достигать  $0,85\text{—}0,95$ , что резко сокращает объемы обработки резанием и отходы металла в стружку. Точность отливок соответствует 8—11-му квалитетам, а припуски на обработку резанием для отливок размером до 50 мм составляют около 1,4 мм, а размером до 500 мм — около 3,5 мм. Поэтому ли-

тые по выплавляемым моделям относятся к прогрессивным материало- и трудо-сберегающим технологическим процессам обработки металлов.

Наряду с преимуществами способ обладает следующими недостатками:

- 1) процесс изготовления формы многооперационный, трудоемкий и длительный;
- 2) большое число технологических факторов, влияющих на качество формы и отливки, и соответственно сложность управления качеством;
- 3) большая номенклатура материалов, используемых для получения формы (материалы для моделей, суспензии, обсыпки блоков, опорные материалы);
- 4) сложность манипуляторных операций изготовления моделей и форм, автоматизации этих операций;
- 5) повышенный расход металла на литники и поэтому невысокий технологический выход годного.

Указанные преимущества и недостатки определяют эффективную область использования литья в оболочковые формы по выплавляемым моделям:

- 1) изготовление отливок, максимально приближающихся по конфигурации к готовой детали с целью снижения трудоемкости обработки металлов и сплавов резанием; замена трудоемких операций сварки или пайки для повышения жесткости, герметичности, надежности конструкций детали, узла;
- 2) изготовление тонкостенных крупногабаритных отливок повышенной точности с целью снижения массы конструкции при повышении ее прочности, герметичности и других эксплуатационных свойств;
- 3) изготовление отливок повышенной точности из сплавов с особыми свойствами и структурой.

Производство отливок по выплавляемым моделям находит широкое применение в различных отраслях машиностроения и в приборостроении.

Использование литья по выплавляемым моделям для получения заготовок деталей машин взамен изготовления их из кованных заготовок или проката позволяет в среднем уменьшить отход металла в стружку на 34—90 %; снизить трудоемкость обработки резанием на 25—85 %; себестоимость изготовления деталей на 20-80 %.

Однако следует учитывать, что экономическая эффективность существенно зависит от выбора номенклатуры отливок, изготавливаемых этим способом. Только при правильном выборе номенклатуры деталей можно достичь высокой экономической эффективности производства.

#### 4.5. Литье в кокиль

*Кокиль* – металлическая форма, которая заполняется расплавом под действием гравитационных сил. В отличие от разовой формы кокиль может быть использован многократно. Таким образом, сущность литья в кокили состоит в применении металлических материалов для изготовления многократно используемых литейных форм, металлические части которых составляют их основу и формируют конфигурацию и свойства отливки.

##### *Основные операции технологического процесса*

Перед заливкой расплава новый кокиль готовят к работе: поверхность рабочей полости и разъем тщательно очищают от следов загрязнений, ржавчины, масла; проверяют легкость перемещения подвижных частей, точность их центрирования, надежность крепления. Затем на поверхность рабочей полости и металлических стержней наносят слой огнеупорного покрытия (рис. 4.8, а) — облицовки и краски. Состав облицовок и красок зависит от заливаемого сплава, а их толщина — от требуемой скорости охлаждения отливки: чем толще слой огнеупорного покрытия, тем медленнее охлаждается отливка. Вместе с тем слой огнеупорного покрытия предохраняет рабочую поверхность формы от резкого повышения ее температуры при заливке, расплавления и схватывания с металлом отливки. Таким образом, облицовки и краски выполняют две функции: защищают поверхность кокиля от резкого нагрева и схватывания с отливкой и позволяют регулировать скорость охлаждения отливки, а значит, и процессы ее затвердевания, влияющие на свойства металла отливки.

Перед нанесением огнеупорного покрытия кокиль нагревают газовыми горелками или электрическими нагревателями до температуры 423—453 К. Краски наносят на кокиль обычно в виде водной суспензии через пульверизатор. Капли водной суспензии, попадая на поверхность нагретого кокиля, испаряются, а огнеупорная составляющая ровным слоем покрывает поверхность.

После нанесения огнеупорного покрытия кокиль нагревают до рабочей температуры, зависящей в основном от состава заливаемого сплава, толщины стенки отливки, ее размеров, требуемых свойств.

Обычно температура нагрева кокиля перед заливкой 473—623 К. Затем в кокиль устанавливают песчаные или керамические стержни (рис. 4.8,б), если таковые необходимы для получения отливки; половины кокиля соединяют (рис. 4.8, в) и скрепляют специальными зажимами, а при установке кокиля на кокильной машине — с помощью ее механизма запирания, после чего заливают расплав в ко-

киль. Часто в процессе затвердевания и охлаждения отливки, после того как отливка приобретет достаточную прочность, металлические стержни «подрывают»,

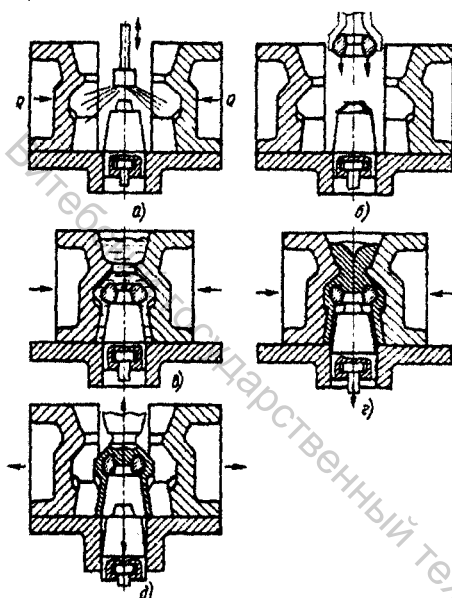


Рис. 4.8. Последовательность изготовления отливки в кокиле:

а — формирование огнеупорного покрытия; б — установка стержня; в — соединение подвижных частей; г — частичное извлечение стержня; д — окончательное извлечение стержня и удаление отливки

изредка восстанавливая ее в местах, где она отслоилась от рабочей поверхности. После этого при необходимости, что чаще бывает при литье тонкостенных отливок или сплавов с низкой жидкотекучестью, кокиль подогревают до рабочей температуры, так как за время извлечения отливки и окраски рабочей поверхности он охлаждается. Если же отливка достаточно массивная, то, наоборот, кокиль может нагреваться ее теплотой до температуры большей, чем требуемая рабочая, и перед следующей заливкой его охлаждают. Для этого в кокиле предусматривают специальные системы охлаждения,

Как видно, процесс литья в кокиль — малооперационный. Манипуляторные операции достаточно просты и кратковременны, а лимитирующей по продол-

т. е. частично извлекают из отливки (рис. 4.8, г) до ее извлечения из кокиля. Это делают для того, чтобы уменьшить обжатию усаживающейся отливкой металлического стержня и обеспечить его извлечение из отливки. После охлаждения отливки до заданной температуры кокиль раскрывают, окончательно извлекают металлический стержень и удаляют отливку из кокиля (рис. 4.8, д). Из отливки выбивают песчаный стержень; обрезают литники, прибыли, выпоры; контролируют качество отливки. Затем цикл повторяется.

Перед повторением цикла осматривают рабочую поверхность кокиля, плоскость разъема. Обычно огнеупорную краску наносят на рабочую поверхность кокиля 1—2 раза в смену,

жительности операцией является охлаждение отливки в форме до заданной температуры. Практически все операции могут быть выполнены механизмами машины или автоматической установки, что является существенным достоинством способа, и, конечно, самое главное — *исключается трудоемкий и материалоемкий процесс изготовления формы: кокиль используется многократно*. В производстве используются кокили различных конструкций. В зависимости от расположения поверхности разъема кокиля бывают неразъемные (вытряхные); с вертикальной плоскостью разъема; с горизонтальной плоскостью разъема; со сложной (комбинированной) поверхностью разъема.

Неразъемные, или вытряхные кокили (рис. 4.9, а), применяют в тех случаях, когда конструкция отливки позволяет удалить ее вместе с литниками из полости кокиля без его разъема. Обычно эти отливки имеют достаточно простую конфигурацию.

Кокили с вертикальной плоскостью разъема (рис. 4.8) состоят из двух или более полуформ. Отливка может располагаться целиком в одной из половин кокиля, в двух половинах кокиля, одновременно в двух половинах кокиля и в нижней плите.

Кокили с горизонтальным разъемом (рис. 4.9, б) применяют преимущественно для простых по конфигурации, а также крупногабаритных отливок, а в отдельных случаях для отливок достаточно сложной конфигурации.

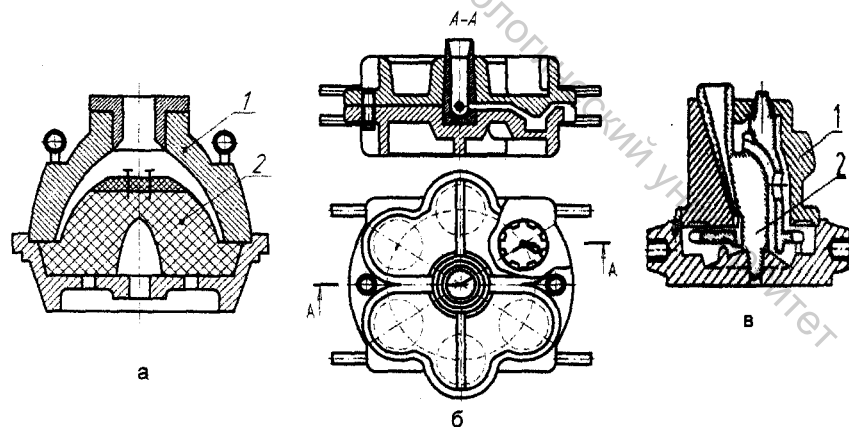


Рис. 4.9. Конструкции кокилей:  
а - кокиль вытряхной. 1 - кокиль, 2 - стержень;  
б - кокиль с горизонтальным разъемом;  
в - кокиль со сложным разъемом

Кокили со сложной (комбинированной) поверхностью разъема (рис. 4.9, в) используют для изготовления отливок сложной конфигурации.

По числу рабочих полостей (гнезд), определяющих возможность одновременного, с одной заливки, изготовления того или иного количества отливок, кокили разделяют на одноместные и многоместные (см. рис. 4.9, б).

В зависимости от способа охлаждения различают кокили с воздушным (естественным и принудительным), с жидкостным (водяным, масляным) и с комбинированным (водо-воздушным и т. д.) охлаждением. Воздушное охлаждение используют для малотеплонагруженных кокилей. Водяное охлаждение используют обычно для высокотеплонагруженных кокилей, а также для повышения скорости охлаждения отливки или ее отдельных частей.

#### *Достоинства литья в кокиль*

1. Повышение производительности труда в результате исключения трудоемких операций смешеприготовления, формовки, очистки отливок от пригара. Поэтому использование литья в кокили, по данным различных предприятий, позволяет в 2—3 раза повысить производительность труда в литейном цехе; снизить капитальные затраты при строительстве новых цехов и реконструкции существующих за счет сокращения требуемых производственных площадей, расходов на оборудование, очистные сооружения; увеличить съем отливок с 1 м<sup>2</sup> площади цеха.

2. Размеры рабочей полости кокиля могут быть выполнены значительно точнее, чем песчаной формы. При литье в кокиль отсутствуют погрешности, вызываемые расталкиванием модели, упругими и остаточными деформациями песчаной формы, снижающими точность ее рабочей полости и соответственно отливки. Поэтому отливки в кокилях получаются более точными. Точность отливок в кокилях обычно соответствует 12—15 квалитетам. При этом точность по 12 квалитету возможна для размеров, расположенных в одной части формы. Точность размеров, расположенных в двух и более частях формы, а также оформляемых подвижными частями формы, ниже. Коэффициент точности отливок по массе достигает 0,71, что обеспечивает возможность уменьшения припусков на обработку резанием.

3. Физико-химическое взаимодействие металла отливки и кокиля минимально, что способствует повышению качества поверхности отливки. Отливки в кокиль не имеют пригара. Шероховатость поверхности отливок определяется со-

ставами облицовок и красок, наносимых на поверхность рабочей полости формы, и соответствует  $Rz = 80—10$  мкм, но может быть и меньше.

4. Механизация и автоматизация процесса изготовления отливки, обусловленная многократностью использования кокиля. При литье в кокиль устраняется сложный для автоматизации процесс изготовления литейной формы. Остаются лишь сборочные операции: установка стержней, соединение частей кокиля и их крепление перед заливкой, которые легко автоматизируются. Вместе с тем устраняется ряд возмущающих факторов, влияющих на качество отливок при литье в песчаные формы, таких, как влажность, прочность, газопроницаемость формовочной смеси, что делает процесс литья в кокиль более управляемым. Для получения отливок заданного качества легче осуществить автоматическое регулирование технологических параметров процесса. Автоматизация процесса позволяет улучшить качество отливок, повысить эффективность производства, изменить характер труда литейщика-оператора, управляющего работой таких комплексов.

Литье в кокили имеет и недостатки.

1. Высокая стоимость кокиля, сложность и трудоемкость его изготовления.

2. Ограниченная стойкость кокиля, измеряемая числом годных отливок, которые можно получить в данном кокиле. От стойкости кокиля зависит экономическая эффективность процесса, особенно при литье чугуна, стали, и поэтому повышение стойкости кокиля является одной из важнейших проблем технологии кокильного литья этих сплавов.

3. Сложность получения отливок с поднутрениями, для выполнения которых необходимо усложнять конструкцию формы — делать дополнительные разъемы, использовать вставки, разъемные металлические или песчаные стержни.

4. Отрицательное влияние высокой интенсивности охлаждения расплава в кокиле по сравнению с песчаной формой. Это ограничивает возможность получения тонкостенных протяженных отливок, а в чугунных отливках приводит к отбелу поверхностного слоя, ухудшающему обработку резанием; вызывает необходимость термической обработки отливок.

5. Неподатливый кокиль приводит к появлению в отливках напряжений, а иногда к трещинам.

Преимущества и недостатки этого способа определяют рациональную область его использования: экономически целесообразно вследствие высокой стоимости кокилей применять этот способ литья только в серийном или массовом



производстве. Серийность при литье чугуна должна составлять более 20 крупных или более 400 мелких отливок в год, а при литье алюминиевых — не менее 400—700 отливок в год.

#### *Эффективность литья в кокиль*

Эффективность литья в кокиль обычно определяют в сравнении с литьем в песчаные формы. Экономический эффект достигается благодаря устранению формовочной смеси; повышению качества отливок, их точности; уменьшению припусков на обработку, снижению трудоемкости очистки и обрубки отливок; механизации и автоматизации основных операций и, как следствие, повышению производительности и улучшению условий труда.

Таким образом, *литье в кокиль с полным основанием следует отнести к трудо- и материалосберегающим, малооперационным и малоотходным технологическим процессам, улучшающим условия труда в литейных цехах и уменьшающим вредное воздействие на окружающую среду.*

#### **4.6. Литье под регулируемым давлением**

Объединяющим технологическим признаком этой группы способов литья является заливка формы выдавливанием жидкого металла снизу вверх из тигля установки через металлопровод под действием создаваемого в них перепада газового давления (рис. 4.10).

К литью под регулируемым перепадом газового давления  $\Delta p$  относятся три способа литья: под низким давлением; с противодавлением; вакуумным всасыванием.

1. При наличии в полости формы давления газа, соответствующего атмосферному ( $p_{\phi} = p_{\text{атм}}$ ), заливка осуществляется благодаря избыточному давлению газа ( $p_{\text{изб}} > p_{\text{атм}}$ ) над зеркалом расплава в тигле установки (рис. 4.10, а):

$$\Delta p = p_{\text{T}} - p_{\phi} = p_{\text{изб}} - p_{\text{атм}}, \quad (4.1)$$

где  $p_{\text{T}}$  — давление над зеркалом расплава в тигле.

Этот способ получил название литья под низким давлением.

2. При давлении газа в полости формы, превышающем атмосферное ( $p_{\phi} > p_{\text{атм}}$ ), для надежного заполнения литейной формы расплавом перепад давлений над зеркалом расплава в тигле должен составлять

$$\Delta p = p_{\text{T}} - p_{\phi} = p_{\text{изб}} - (p_{\text{атм}} + \Delta p_{\phi}). \quad (4.2)$$

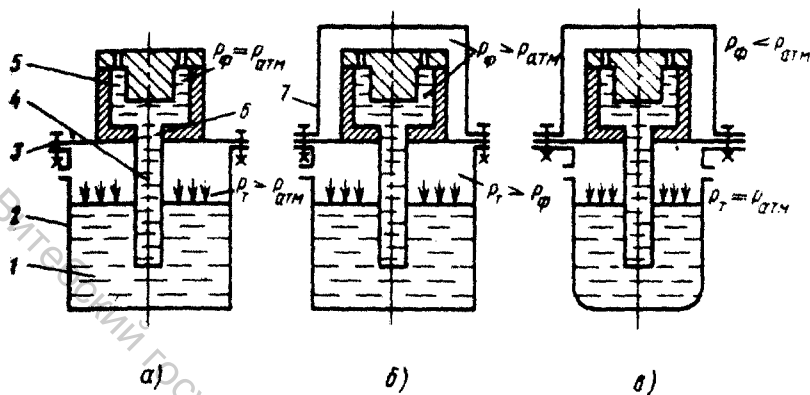


Рис. 4.10. Схемы способов литья:

а – под низким давлением; б – с противодействием; в – вакуумным всасыванием

1 – расплав; 2 – камера, герметичный тигель с расплавом; 3 – крышка камеры; 4 – металлопровод;  
5 – литейная форма; 6 – литейник; 7 – камера, герметизирующая форму

Заполнение формы расплавом, вопреки препятствию находящегося в ее полости сжатого газа ( $\Delta p_{\phi}$ ), обусловило название этого процесса – литье с противодействием.

3. Способ литья вакуумным всасыванием основан на прямо противоположном эффекте – устранении противодействия газа в полости формы путем ее вакуумирования и достижения соотношения  $p_{\phi} < p_{\text{атм}}$ . В итоге жидкий металл поступает снизу вверх в полость формы под действием перепада давлений:

$$\Delta p = p_{\text{T}} - p_{\phi} = p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}}, \quad (4.3)$$

Где  $p_{\text{вак}}$  – давление вакуумирования.

Скорость заполнения форм жидким металлом при всех рассматриваемых способах литья зависит от скорости нарастания  $\Delta p$  во времени  $t$ :

$$\omega_p = \varphi \Delta p / t, \quad (4.4)$$

где  $\varphi$  – коэффициент, учитывающий гидравлическое сопротивление системы.

### Литье под низким давлением

Схема установки литья под низким давлением приведена на рис. 4.11. Тигель с расплавом 8 в раздаточной печи (камере) установки герметически закрывают крышкой 4, в которой установлен металлопровод 7, изготовленный из жаростойкого материала. Металлопровод 7 погружают в расплав так, что конец его не достает до дна тигля на 40—60 мм. Форму 2, установленную на крышке, соединяют с металлопроводом литниковой втулки 3. Полость в отливке может быть выполнена металлическим, оболочковым или песчаным стержнем 1.

Воздух или инертный газ под давлением до 0,1 МПа через систему регулирования поступает по трубопроводу 6 внутрь камеры установки и давит на зеркало расплава. Вследствие разницы между давлением в камере установки и атмосферным давлением расплав поступает в форму снизу через металлопровод 7, литник 9 и коллектор 10 со скоростью, регулируемой давлением в камере установки. По окончании заполнения формы и затвердевания отливки автоматически открывается клапан 5, соединяющий камеру установки с атмосферой. Давление воздуха в камере снижается до атмосферного и незатвердевший расплав из металлопровода сливается в тигель. После этого форма раскрывается, отливка извлекается и цикл повторяется.

При литье под низким давлением отливку можно изготавливать в кокиле, песчаной или комбинированной форме (кокиль и песчаные или оболочковые стержни), а также в керамической или оболочковой форме. Песчаные и керамические формы применяют редко, чаще используют кокили или кокили с песчаными и оболочковыми стержнями, так как процесс сборки кокиля легче автоматизировать.

Основными преимуществами процесса литья под низким давлением являются: автоматизация трудоемкой операции заливки формы; возможность регу-

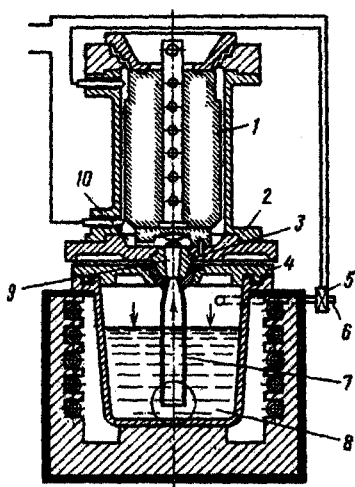


Рис. 4.11. Установка для литья под низким давлением

1 - стержень; 2 - форма; 3 - литниковая втулка; 4 - крышка; 5 - клапан; 6 - воздуховод; 7 - металлопровод; 8 - расплав; 9 - литник; 10 - коллектор

лирования скорости потока расплава в полости формы изменением давления в камере установки, что важно для улучшения заполнения форм тонкостенных отливок; улучшение питания отливки, что повышает ее плотность, благодаря избыточному давлению на расплав при его кристаллизации; снижение расхода металла на литниковую систему, так как незатвердевший расплав из металлопровода сливается в тигель, что повышает коэффициент выхода годного (во многих случаях до 90 %) металла.

Наряду с указанными преимуществами способ литья под низким давлением имеет недостатки: невысокую стойкость части металлопровода, погруженной в расплав, что затрудняет использование способа литья для сплавов с высокой температурой плавления; сложность системы регулирования скорости потока расплава в форме, вызванную динамическими процессами, происходящими в установке при заполнении ее камеры воздухом, нестабильностью утечек воздуха через уплотнения, понижением уровня расплава в установке по мере изготовления отливок; возможность ухудшения качества сплава при длительной выдержке в тигле установки; сложность эксплуатации и наладки установок.

Преимущества и недостатки способа определяют рациональную область его применения и перспективы использования. Литье под низким давлением наиболее широко применяют для изготовления сложных фасонных и особенно тонкостенных отливок из алюминиевых и магниевых сплавов, простых отливок из медных сплавов и стали в серийном и массовом производстве. Причем очень часто создают и эксплуатируют специализированные установки для производства одной или однотипных деталей. При этом динамические характеристики системы изменяются незначительно, и процесс литья становится устойчивым.

#### *Литье с противодавлением*

Развитием способа литья под низким давлением является литье с противодавлением. Установка для литья с противодавлением (рис. 4.12, а) состоит из верхней 11 и нижней 12 камер. В камере 12 располагается тигель 7 с расплавом 6. В камере 11 находится форма 3, обычно металлическая. Камеры 11 и 12 разделены герметической крышкой 4, через нее проходит металлопровод 2, соединяющий тигель 7 и форму 3. Камеры 11 и 12 прочно соединены одна с другой зажимами 5.

В начальный момент сжатый воздух или инертный газ при требуемом по технологии давлении, например 0,5—0,6 МПа, поступает через вентили 8 в камеры 11 и 12. Вентиль 10 при этом закрыт, и расплав в тигле 7 остается неподвижным. По достижении заданного давления вентиль 10 закрывается, а вентиль 1 постепенно открывается. В результате давление в камере 11 понижается, и под действием разности давлений в камерах 11 и 12 расплав поднимается по металлопроводу и заполняет форму. После заполнения формы расплав затвердевает под избыточным всесторонним давлением, что значительно улучшает питание отливки, уменьшает усадочную

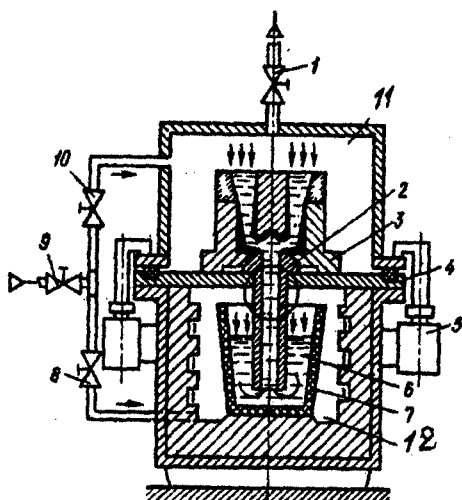


Рис. 4.12. Установка для литья с противодавлением

- 1 – вентиль; 2 – металлопровод; 3 – форма; 4 – герметичная крышка; 5 – зажим; 6 – расплав; 7 – тигель; 8, 9, 10 – вентили; 11 – верхняя камера; 12 – нижняя камера

и газовую пористость, повышает ее механические свойства и герметичность. По существу, в этом процессе литья совмещены два способа: способ литья под низким давлением, используемый для заполнения полости формы, и способ кристаллизации отливок под всесторонним давлением газа или воздуха.

Этот способ литья дает наибольший эффект при изготовлении отливок с массивными стенками равномерной толщины из алюминиевых и магниевых сплавов, кристаллизующихся в широком интервале температур. Использование второй стадии процесса кристаллизации под всесторонним избыточным давлением для тонкостенных отливок не всегда приводит к заметному улучшению их свойств. Это объясняется тем, что продолжительность кристаллизации тонкостенных отливок мала, и отливка затвердевает прежде, чем давление в верхней камере установки достигнет необходимой величины.

Сущность процесса литья вакуумным всасыванием состоит в том, что расплав под действием разрежения, создаваемого в полости формы, заполняет ее и затвердевает, образуя отливку. Изменением разности между атмосферным давлением и давлением в полости формы можно регулировать скорость заполнения формы расплавом, управляя этим процессом. Вакуумирование полости форм при заливке позволяет заполнять формы тонкостенных отливок с толщиной стенки 1—1,5 мм, исключить попадание воздуха в расплав, повысить точность, герметичность и механические свойства отливок.

Установка (рис. 4.13) имеет две камеры: нижнюю 9 и верхнюю 8. Нижняя камера представляет собой раздаточную печь с электрическим или газовым обогревом, в которой располагается тигель 1 с расплавом. Верхняя камера 8 расположена на крышке 2 нижней камеры; в крышке 2 установлен металлопровод 3. Форму 4 устанавливают и закрепляют в камере 6 так, чтобы литник 5 соединялся с металлопроводом 3. Верхняя камера 8 герметически соединяется прижимами 6 с крышкой 2. Полость верхней камеры через вакуум-провод 7 соединена с ресивером, в котором насосом создается разрежение, регулируемое системой управления.

В начальный момент процесса клапан управления открывается; в каме-

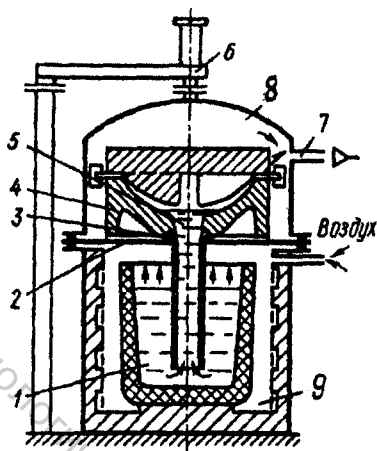


Рис. 4.13. Установка для литья вакуумным всасыванием

- 1 — тигель с расплавом; 2 — крышка; 3 — металлопровод; 4 — форма; 5 — литник; 6 — прижим;  
7 — вакуум-провод; 8 — верхняя камера; 9 — нижняя камера

ре 8 создается разрежение, и расплав вследствие разницы давлений в камерах 9 (атмосферное) и 8 (менее атмосферного) по металлопроводу 3 поднимается и заполняет полость формы. После затвердевания отливки клапан системы управления соединяет полость камеры 8 с атмосферой; давление в верхней и нижней камерах становится одинаковым, а остатки незатвердевшего расплава сливаются из

металлопровода 3 в тигель 1. Камера 8 снимается, форма 4 с отливкой извлекается, и цикл может повторяться.

Установки такого типа используют обычно для улучшения заполнения форм тонкостенных сложных фасонных отливок из алюминиевых и магниевых сплавов с толщиной стенки до 2—2,5 мм, а иногда и до 1—1,5 мм.

При литье вакуумным всасыванием улучшаются механические свойства отливок. Например, предел прочности отливок из алюминиевого сплава АЛ9 возрастает на 5—10 %, а относительное удлинение на 30 % по сравнению с литьем в кокиль.

#### **4.7. Литье под давлением**

Сущность процесса заключается в том, что форма заполняется расплавом под действием внешних сил, превосходящих силы гравитации, а затвердевание отливки протекает под избыточным давлением. Сочетание этих двух особенностей процесса позволяет получать отливки высокого качества. Чистая поверхность и точные размеры рабочей полости металлической пресс-формы, высокая скорость движения расплава позволяют резко сократить продолжительность заполнения, улучшить заполняемость и получать тонкостенные отливки сложной конфигурации с чистой поверхностью.

Внешнее давление на затвердевающий расплав и высокие скорости охлаждения его в металлической форме способствуют измельчению структуры металла в отливке, уменьшению усадочных дефектов, повышению механических свойств.

Различают литье под давлением с холодной камерой прессования (рис. 4.14) и с горячей камерой прессования (рис. 4.15). Литье под давлением с холодной камерой прессования заключается в том, что расплавленный металл заливается в камеру прессования 1 специальной машины, а затем под действием поршня 2, перемещающегося в этой камере, через литниковые каналы заполняет полость металлической пресс-формы, затвердевает под избыточным давлением и образует отливку. После затвердевания и охлаждения до определенной температуры из отливки сначала извлекаются стержни 3 (рис. 4.14, б), а затем пресс-форма раскрывается (рис. 4.14, в) и толкатели 4 удаляют отливку из пресс-формы (рис. 4.14, г). От отливки отделяют литники и зачищают заусенцы.

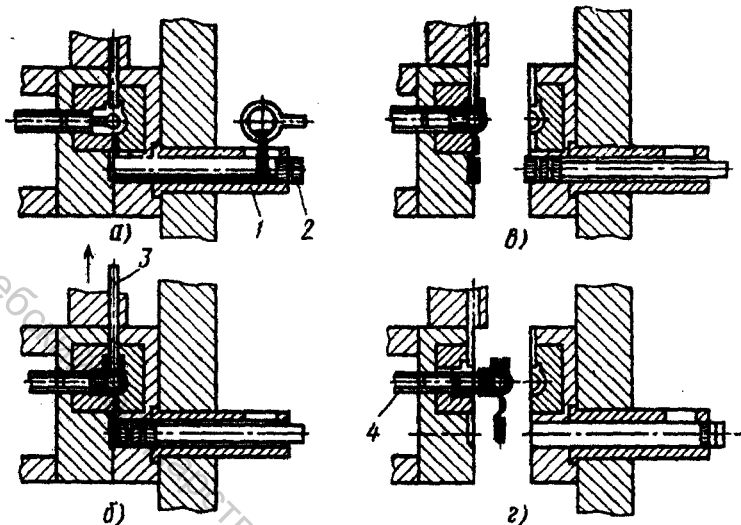


Рис. 4.14. Схема технологического процесса литья под давлением на машине с холодной камерой прессования:

а – заполнение камеры прессования; б – заполнение полости пресс-формы; в – разъем пресс-формы; г – удаление отливки

1 – камера прессования; 2 – поршень; 3 – стержень; 4 – толкатель

Литьем под давлением с холодной камерой прессования изготавливают отливки для различных отраслей машиностроения и приборостроения из цинковых, алюминиевых, магниевых, медных сплавов, реже из чугуна и стали, массой от нескольких граммов до нескольких десятков килограммов, обычно тонкостенные, сложной конфигурации, с развитой поверхностью.

Размеры и масса отливок зависят от мощности машин, на которых осуществляется процесс: чем большее усилие заклипирования пресс-формы, скорость перемещения подвижных частей и давление литья, тем больших размеров возможно получение отливок.

В горячехамерных машинах камера прессования 1 располагается в тигле 2 и сообщается с ним отверстием 3, через которое в нее поступает расплав (рис. 4.15, а). При движении поршня вниз отверстие 3 перекрывается, и расплав по обогреваемому каналу 5 поступает в пресс-форму (рис. 4.15, б). После затвердевания отливки поршень 4 возвращается в исходное положение, и остатки расплава



ва из канала 5 сливаются в камеру прессования (рис. 4.15, в). Пресс-форма раскрывается, отливка 7 выталкивается из нее толкателями 8, после чего пресс-форма закрывается, и цикл повторяется.

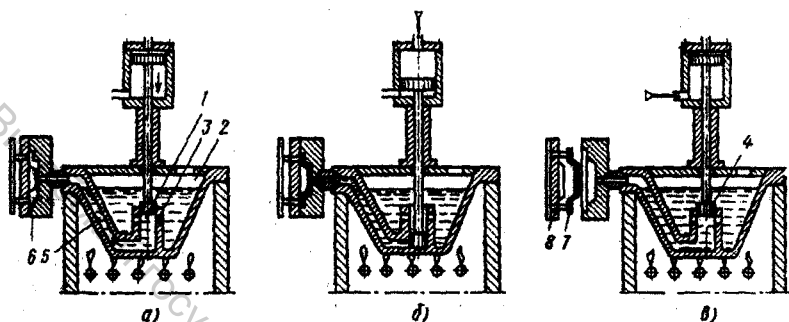


Рис. 4.15. Схема технологического процесса литья под давлением на машине с горячей камерой прессования:

а – исходное положение; б – заполнение пресс-формы и кристаллизация; в – раскрытие пресс-формы и извлечение отливки

1 – камера прессования; 2 – тигель; 3 – отверстие; 4 – поршень; 5 – канал; 6 – пресс-форма; 7 – отливка; 8 – толкатель

Машины с горячей камерой по сравнению с холодной более производительны, однако камера прессования и прессовый поршень на этих машинах работают в тяжелых условиях: они постоянно погружены в расплав, быстро изнашиваются и требуют замены. Такие машины обычно используют для получения отливок из цинковых, свинцово-сурьмянистых, магниевых сплавов, не взаимодействующих с материалами поршня и камеры прессования.

Камера прессования на машинах литья под давлением может быть расположена горизонтально (см. рис. 4.14) или вертикально (см. рис. 4.15). Машины с горизонтальной холодной камерой прессования позволяют развивать значительные усилия запираания и прессования, могут иметь большие камеры прессования. Поэтому такие машины используют для изготовления отливок из алюминиевых, медных, магниевых сплавов, чугуна и стали. Однако на таких машинах трудно получать особо мелкие точные отливки, так как расплав быстро охлаждается в камере прессования и заполняемость форм ухудшается.

Машины с вертикальной горячей камерой прессования лишены этого недостатка, и их используют преимущественно для изготовления мелких, небольших отливок с тонкими стенками. Получать на этих машинах крупные отливки сложно, так как в камерах прессования, работающих в расплаве, трудно создать высокие давления прессования, необходимые для получения крупногабаритных отливок.

#### *Особенности формирования и качество отливок.*

При литье под давлением основные показатели качества отливки — точность размеров, шероховатость поверхности, механические свойства, плотность и герметичность — определяются особенностями ее формирования.

1. Поток расплава в литниковой системе и полости пресс-формы движется с высокими скоростями. Скорость впуска расплава в пресс-форму колеблется от 0,5 до 120 м/с, а конечное давление на расплав может достигать 490 МПа. Форма заполняется за десятки, а часто и за сотые доли секунды. Это позволяет, несмотря на высокую скорость охлаждения расплава в форме, изготавливать весьма тонкостенные отливки с толщиной стенки менее 1 мм. Высокая кинетическая энергия движущегося расплава и статическое давление в момент окончания заполнения формы способствует получению чистой поверхности отливки.

2. Использование металлической пресс-формы с точными размерами рабочей полости и давление на расплав и затвердевающую отливку способствуют повышению точности отливок по массе и размерам. Высокая точность размеров отливок до 8—13-го квалитетов позволяет уменьшить припуски на обработку до 0,3—0,8 мм, а в некоторых случаях полностью исключить обработку резанием; остается только зачистка мест удаления питателей и облоя. Коэффициент точности отливок по массе при литье под давлением достигает 0,95—0,98. Шероховатость поверхности отливок под давлением зависит в основном от шероховатости поверхности пресс-формы и технологических режимов литья. Обычно отливки под давлением имеют шероховатость  $R_z=20$ —10 мкм и даже  $R_a=1,25$ —0,63 мкм.

3. Полное исключение трудоемких операций изготовления, сборки и выбивки форм; металлическая пресс-форма используется многократно; сборка формы и извлечение из нее готовой отливки выполняются машиной; процесс получения отливки малооперационный. Указанные обстоятельства и высокая скорость затвердевания отливки в пресс-форме делают процесс литья под давлением одним

из самых высокопроизводительных литейных процессов и создают предпосылки для полной автоматизации производства;

Наряду с указанными преимуществами литье под давлением имеет ряд недостатков.

1. Габаритные размеры и масса отливок ограничены мощностью машины (усилием, развиваемым механизмом запыриания).

2. Высокая стоимость пресс-формы, сложность и трудоемкость изготовления, ограниченная стойкость, особенно при литье сплавов черных металлов и медных сплавов, что снижает эффективность процесса и ограничивает область его использования.

Повышение стойкости пресс-форм является одной из важных проблем, особенно при литье сплавов, имеющих высокую температуру плавления. Удлинение срока службы пресс-форм повышает эффективность производства, а также позволяет расширить номенклатуру сплавов, из которых могут быть получены отливки под давлением.

3. Трудности выполнения отливок со сложными полостями, поднутрениями, карманами.

4. Наличие в отливках газовоздушной и часто усадочной пористости, что снижает пластические характеристики металла отливок, их герметичность, затрудняет термическую обработку, вследствие чего ограничиваются возможности изготовления отливок из сплавов, упрочняемых термической обработкой. Получение отливок без газовоздушной и усадочной пористости является одной из важных проблем, решение которой позволяет расширить область применения этого перспективного технологического процесса, эффективность его использования.

5. Жесткая неподатливая пресс-форма способствует появлению напряжений в отливках при усадке, что также ограничивает номенклатуру сплавов, из которых могут быть изготовлены отливки.

Преимущества и недостатки способа определяют рациональную область его использования. Экономически целесообразно, вследствие высокой стоимости пресс-форм, сложности оборудования, высокой производительности, применять литье под давлением в массовом и крупносерийном производстве точных отливок с минимальными припусками на обработку из легких, цинковых и медных сплавов, а в некоторых случаях и специальных сплавов и сталей.

Этот процесс с полным основанием может быть отнесен к малооперационным и практически безотходным технологиям, так как литники и облой подвергают переплавке, а отходы в стружку малы.

#### **4.8. Литье с кристаллизацией под давлением**

Литье с кристаллизацией под давлением отличается отсутствием камер прессования, а процесс осуществляется на вертикальных гидравлических прессах.

Отливки изготавливают в формах (пресс-формах, штампах), состоящих из пуансона (прессующего узла), матрицы, толкателей и съемников. Верхнюю плиту с закрепленными на ней деталями прессующего узла монтируют на ползуне прессы, а нижнюю плиту с размещенными на ней матрицей и механизмом выталкивания отливки — на столе прессы.

Процесс заключается в том, что расплав под действием собственной силы тяжести заливают в матрицу, затем пуансоном осуществляют окончательное оформление контуров отливки и последующее ее уплотнение (выдержку под давлением) до окончания затвердевания. После извлечения из пресс-формы отливку можно подвергать различным видам последующей обработки (термической и механической).

Этим способом изготавливают простые и сложные по конфигурации заготовки из чистых металлов и сплавов на основе алюминия, железа, магния, меди и цинка, используя для этой цели как специализированные, так и неспециализированные гидравлические прессы и машины.

Процесс осуществляется по следующим схемам (рис. 4.16): поршневое прессование; пуансонное прессование; пуансоно-поршневое прессование; прессование через литники-питатели.

При поршневом прессовании давление кристаллизующемуся расплаву передается через пуансон, перекрывающий открытую полость матрицы и действующий на верхний торец формирующейся отливки в течение времени, необходимого для ее затвердевания. К моменту приложения давления в местах соприкосновения расплава с матрицей образуется корка, а уровень сплава в матрице понижается вследствие объемной усадки. Поэтому пуансон (поршень) воздейст-

вует вначале на вертикальную корку, а после соприкосновения с незатвердевшим сплавом уплотняет всю отливку.

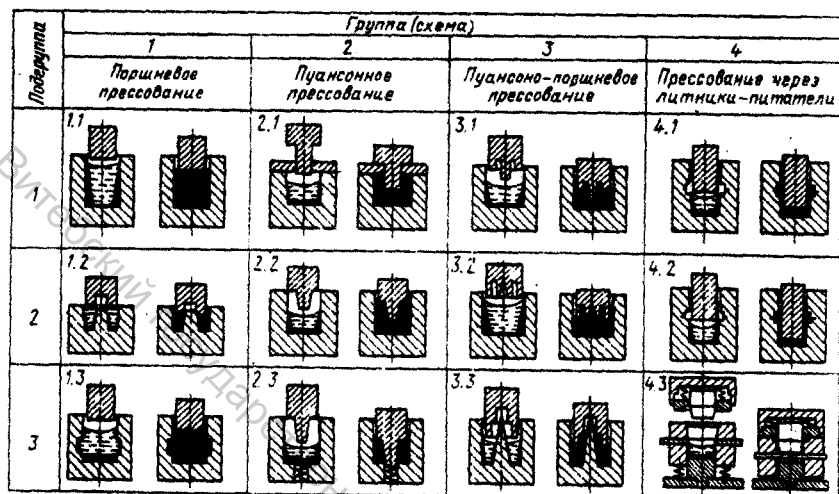


Рис. 4.16. Классификация схем прессования ЛКД

Формообразование отливки при поршневом прессовании практически полностью осуществляется во время свободной заливки расплава в матрицу. Основная масса расплава при контакте с пуансоном не перемещается (за исключением верхней части) при понижении уровня во время уплотнения затвердевающей отливки.

При пуансонном прессовании под действием выступающей рабочей части пуансона незатвердевший сплав выдавливается вверх до полного заполнения рабочей полости пресс-формы. Особенностью этой схемы является то, что пуансон вначале соприкасается с расплавом, удаленным от боковых стенок матрицы, и вытесняет его выше уровня заливки. Пуансон не соприкасается с вертикальной коркой, образовавшейся до его внедрения в расплав. Таким образом, формообразование отливки частично происходит при заливке расплава в матрицу и выдержке его в матрице до подхода пуансона, а заканчивается после внедрения пуансона в кристаллизующийся расплав.

При пуансоно-поршневом (комбинированном) прессовании формообразование отливки частично осуществляется во время заливки расплава в матри-

цу и выдержке его в ней до соприкосновения с пуансоном, а заканчивается после вытеснения части незатвердевшего сплава в полости, ограниченные пуансоном и расположенные выше уровня заливки расплава в матрицу. Перемещение незатвердевшего сплава происходит как при сжатии вертикальной корки (подгруппы 3.2 и 3.3), так и при выдавливании его вверх выступающими элементами пуансона.

Особенность рассматриваемой схемы прессования заключается в том, что вытесненный незатвердевший сплав не соприкасается со стенками матрицы, а заполняет рабочие полости в пуансоне. С момента приложения давления пуансон также воздействует на вертикальную корку, соприкасающуюся с боковыми стенками матрицы и образовавшуюся до момента соприкосновения сплава с пуансоном.

При прессовании через питатели (выдавливании расплава в закрытые полости) расплав заливают в металлоприемник. Из этого металлоприемника металл пуансоном вытесняется в закрытые полости пресс-формы, в которых могут быть изготовлены одновременно одна или несколько отливок. Движение расплава из металлоприемника в рабочие полости пресс-формы осуществляется по питателям в матрице (подгруппа 4.1) или пуансоне (4.2) через отверстия в специальной раздвижной диафрагме (4.3) или непосредственно из металлоприемника (без использования питателей и диафрагм).

При поршневом и пуансоно-поршневом прессовании, когда пуансон с момента приложения давления воздействует на вертикальную корку, образовавшуюся во время выдержки расплава в матрице под атмосферным давлением, давление должно быть выше, чем при пуансонном прессовании. Кроме того, поршневое прессование предопределяет возможность применения любых литейных и деформируемых сплавов для отливок, а пуансонное и пуансоно-поршневое — только сплавов, не склонных к плёнообразованию.

В рассмотренных схемах прессование осуществляется сверху одним пуансоном (т. е. давление является односторонним). Для отливок с несколькими тепловыми узлами используют не один, а несколько пуансонов, действующих в одном направлении (сверху или снизу), под углом или навстречу друг другу (рис. 4.17).

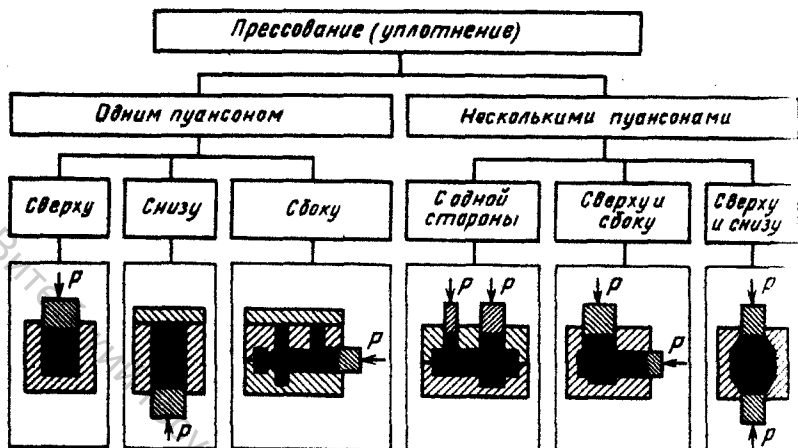


Рис. 4.17. Классификация схем прессования по направлению действия пуансона

Литьем с кристаллизацией под давлением изготавливают отливки, имеющие различную наружную конфигурацию и толщину стенок от 2 до 100 мм, а также слитки с  $D=30-600$  мм и  $H/D=0,5-6$  (большие значения  $H/D$  характерны для слитков малого диаметра).

Предпочтительными деталями для литья с кристаллизацией под давлением являются такие детали, для которых могут быть использованы наиболее простые пресс-формы с неразъемной матрицей. Желательно, чтобы на наружных боковых поверхностях деталей не было больших выступов и поднутрений. Вместе с тем, на верхней поверхности детали, оформляемой пуансоном, и на нижней поверхности, соприкасающейся с дном матрицы, могут быть различные выступы и углубления, для выполнения которых в обычных условиях требуется большое число фрезерных операций. Не следует считать, что указанными деталями ограничивается номенклатура изделий для рассматриваемого способа литья. Возможно литье и сложных деталей, для изготовления которых необходимы пресс-формы с съемными частями, несколькими плоскостями разъема и т. п.

Классификация отливок, которые возможно изготавливать литьем с кристаллизацией под давлением, приведена в табл. 4.1. Для каждой группы и подгруппы указаны характеристика отливок, схема литья с кристаллизацией под давлением, эскизы типовых отливок (рис. 4.18 – 4.21).

**Классификация отливок, которые возможно изготавливать литьем с кристаллизацией под давлением**

| Группа | Подгруппа | Характеристика отливки                              | Эскиз отливки, тип                  | Схема литья                                                                 |
|--------|-----------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| I      | —         | Отливки без внутренних полостей и отверстий, слитки | Рис. 4.18                           | Поршневое прессование                                                       |
| II     | A         | Отливки с внутренними полостями и отверстиями       | Рис. 4.19                           | Поршневое или пуансонное прессование                                        |
|        | Б         |                                                     | Рис. 4.20                           | Пуансонное прессование                                                      |
| III    | A         | Отливки с полостями и выступами на верхнем торце    | Рис. 4.21, а                        | Пуансонное или пуансоно-поршневое прессование                               |
|        | Б         | Отливки с выступами на верхнем торце                | Рис. 4.21, б                        | Пуансонно-поршневое прессование                                             |
| IV     | —         | Мелкие отливки различной конфигурации               | Различные детали приборов и т. п.   | Пуансоно-поршневое прессование или выдавливание расплава в закрытые полости |
| V      | —         | Отливки сложной конфигурации                        | Шестерни с зубом, звездочки и т. п. | Выдавливание расплава в закрытые полости                                    |

Деление отливок в пределах одной группы на подгруппы связано с тем, что одни и те же отливки можно отливать с использованием различных схем приложения давления.

К группе I отнесены преимущественно простые массивные отливки, которые предназначены для изготовления поршневым прессованием. Как правило, верхний торец таких отливок является плоским. Пуансон воздействует либо на всю (максимальную) площадь проекции отливки (рис. 4.18, а-в), либо только на утолщенную часть (рис. 4.18, г). В последнем случае необходимо применять пресс-форму с разъемной матрицей.

В группу II (подгруппа A) включены отливки с углублениями и отверстиями, которые можно изготавливать как при поршневом (рис. 4.19, а), так и при пуансонном прессовании (рис. 4.19, б).

Как правило, эти отливки имеют плоские торцы и полости (отверстия). Выбор той или иной схемы прессования зависит от литейного сплава, используемого



для изготовления отливки, и мощности прессового оборудования. В подгруппу Б включены отливки, которые предназначены для изготовления только в условиях пуансонного прессования (рис. 4.20). Эти отливки имеют либо глубокие полости (рис. 4.20, а), либо отверстия (рис. 4.20, б).

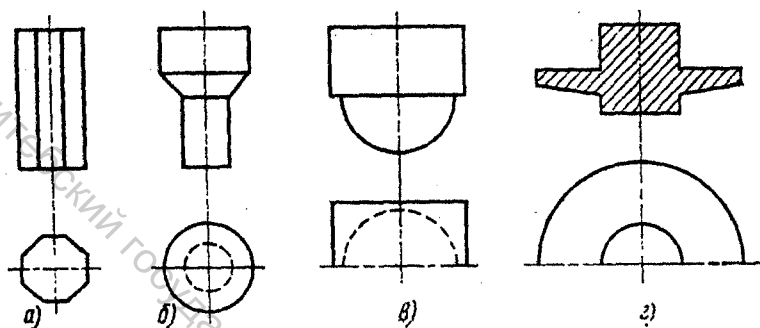


Рис. 4.18. Отливки группы I для поршневого прессования  
а, б, в – пуансон воздействует на всю площадь проекции отливки

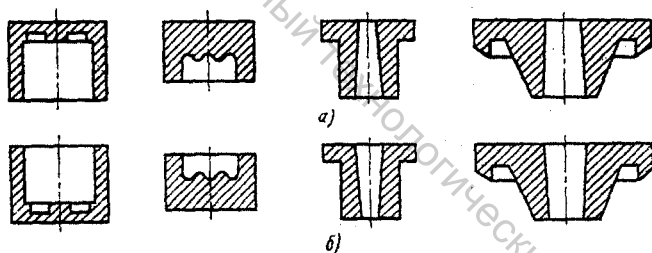


Рис. 4.19. Отливки группы II (подгруппа А) для поршневого (а) и пуансонного (б) прессования

К группе III отнесены отливки типа фланцев, крышек, панелей и т. п., которые можно изготавливать пуансонным и пуансоно-поршневым прессованием (подгруппа А, рис. 4.21, а) или только пуансоно-поршневым прессованием (подгруппа Б, рис. 4.21, б).

В группу IV включены преимущественно мелкие отливки; прилагать давление к каждой такой отливке в отдельности нерационально.

К группе V отнесены сложные отливки, например шестерни и венцы с литым зубом. Изготавливать подобные отливки с применением обычных схем не всегда рационально из-за нестабильности и качества получаемых отливок. В этом

случае возможно применение схемы литья с выдавливанием расплава в рабочую полость, расположенную выше уровня заливаемого расплава.

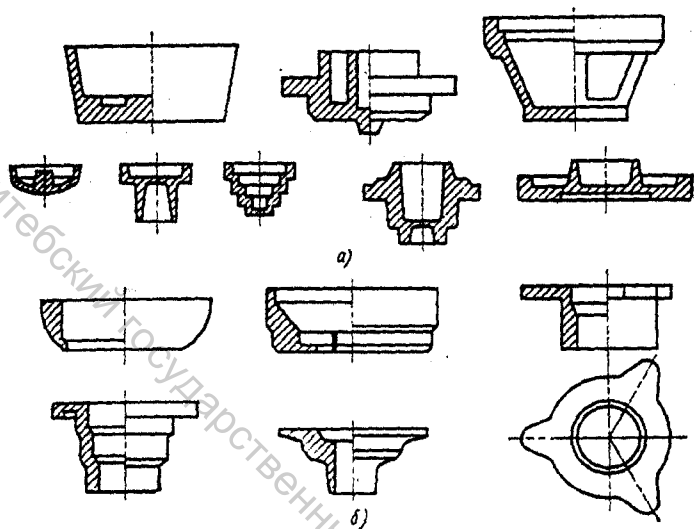


Рис. 4.20. Отливки группы II подгруппы (Б) для пуансонного прессования:  
а – с внутренней полостью; б – с отверстием

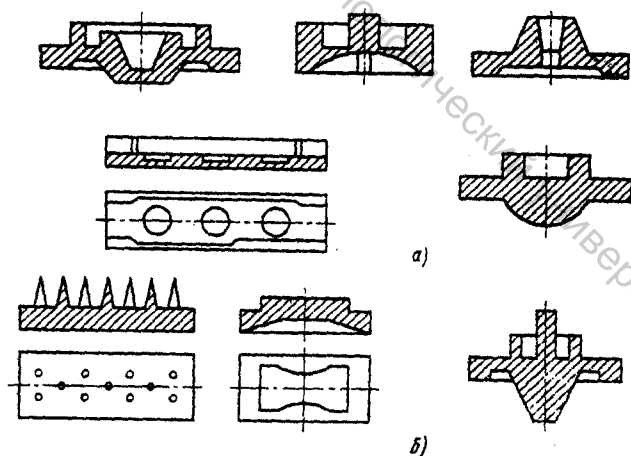


Рис. 4.21. Отливки группы III для пуансонного и пуансоно-поршневого прессования  
(а) и только для пуансоно-поршневого прессования (б):  
а – подгруппа А; б – подгруппа Б

#### 4.9. Центробежное литье

Центробежное литье — это способ изготовления отливок, при котором заполнение формы расплавом и его затвердевание происходят в поле действия центробежных сил.

Чаще используют два варианта способа, при которых расплав заливается в форму с горизонтальной осью вращения или с вертикальной осью вращения. В первом случае получают отливки тела вращения малой и большой протяженности, во втором отливки тела вращения малой протяженности и фасонные. Формы приводятся во вращение машинами, называемыми центробежными.

Наиболее распространен способ литья во вращающиеся металлические формы с горизонтальной осью вращения. По этому способу (рис. 4.22) отливка формируется со свободной поверхностью в поле центробежных сил, а формообразующей поверхностью служит внутренняя поверхность формы (изложницы). Расплав 1 из ковша 3 заливают во вращающуюся форму 5 через заливочный желоб 2. Расплав растекается по внутренней поверхности формы, образуя под действием центробежных сил пустотелый цилиндр. После затвердевания металла и остановки вращения отливка 4 извлекается из формы.

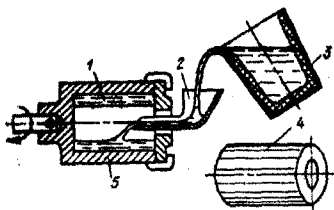


Рис. 4.22. Схема получения отливки при вращении формы вокруг горизонтальной оси

1 — расплав; 2 — заливочный желоб; 3 — ковш; 4 — отливка; 5 — вращающаяся форма

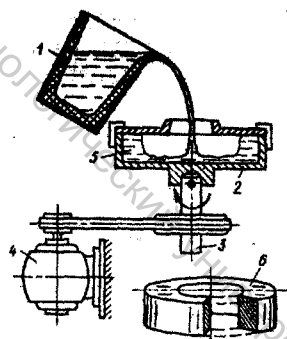


Рис. 4.23. Схема получения отливки при вращении формы вокруг вертикальной оси

1 — расплав; 2 — форма; 3 — шпиндель; 4 — электродвигатель; 5 — расплав; 6 — отливка

При получении отливок со свободной поверхностью при вращении формы вокруг вертикальной оси (рис. 4.23) расплав из ковша 1 заливают в форму 2, укрепленную на шпинделе 3, приводимом во вращение электродвигателем 4. Расплав

5 под действием центробежных сил отбрасывается к стенкам формы 2 и затвердевает, после этого машину останавливают и извлекают затвердевшую отливку 8.

Отливки с внутренней поверхностью сложной конфигурации получают с использованием стержней в формах с вертикальной осью вращения (рис. 4.24, а). Так отливают венцы зубчатых колес. Расплав из ковша через заливочное отверстие и стояк 1 попадает в центральную полость 2 формы, выполненную стержнями 3 и 4. Затем через щелевые питатели расплав поступает (под действием центробежных сил) в полость формы. Избыток 5 расплава (сверх массы отливок) в центральной полости 2 формы служит прибылью и питает отливки при затвердевании.

Мелкие фасонные отливки изготавливают по варианту (рис. 4.24, б), при котором применяют, например, песчаную форму. Части формы 1 и 2 устанавливают на вращающийся стол. При необходимости используют стержни 4. Рабочие полости 3 должны располагаться симметрично оси вращения для обеспечения балансировки формы. Расплав заливают через центральный стояк, из которого по радиальным каналам он попадает в полости формы.

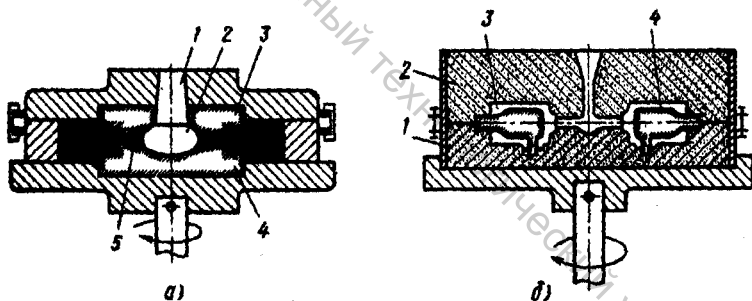


Рис. 4.24. Схема получения фасонных отливок:

а – венцов шестерен: 1 – стол; 2 – центробежная полость; 3, 4 – стержни; 5 – прибыль

б – мелких фасонных отливок: 1, 2 – опоки; 3 – полости; 4 – стержень

Для изготовления отливок центробежным способом применяют различные литейные формы: металлические, песчаные, комбинированные (песчано-металлические), керамические, оболочковые по выплавляемым моделям и др. Формы могут быть предназначены для изготовления отливок на машинах с горизонтальной и вертикальной осью вращения формы, для длинных или коротких от-

ливок цилиндрической формы, для получения фасонных отливок; конструкция формы зависит также от характера производства (единичное, серийное, массовое).

#### *Изготовление чугунных отливок общего назначения*

Для изготовления небольших по массе и размерам (диаметром до 500 мм) отливок используют универсальные шпиндельные машины, для более массивных (массой более 100 кг) — роликовые центробежные машины.

Обычно используют сыпучие теплоизоляционные покрытия. Перед заливкой форму очищают от остатков теплоизоляционного покрытия сжатым воздухом и нагревают до температуры 423—473° К. Такую температуру изложницы поддерживают и при последующих заливках. Затем форму закрывают крышкой, включают двигатель машины и с помощью лотка засыпают в изложницу сыпучий теплоизоляционный материал — сухой песок. Толщина слоя зависит от толщины стенки отливки:

|                                          |       |       |       |        |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| Толщина стенки отливки, мм .....         | До 10 | 10—15 | 15—20 | Св. 20 |
| Толщина теплоизолирующего слоя, мм ..... | 1,5   | 2,5   | 4     | 5      |

Перед заливкой желоб нагревают и вводят в изложницу так, чтобы расплав, заливаемый в изложницу, падал на ее стенки с минимальной высоты. Способ дозирования расплава выбирают в зависимости от массы отливки и требований к точности ее размеров. Для крупных отливок с невысокими требованиями к точности размеров свободной поверхности используют дозирование по объему, для более точных — по массе или переливу. Для отливок массой до 10 кг продолжительность заливки 5—10 с, а для более крупных не более 15 с. Температура заливки чугуна выдерживается в пределах, рекомендуемых при литье в кокиль. После заливки желоб выдвигают; изложница вращается до тех пор, пока температура отливки не понизится до 873—973 К. Для ускорения охлаждения отливки после затвердевания ее обдувают сжатым воздухом, включают систему охлаждения изложницы и останавливают машину. Затем открывают крышку изложницы и механизмом извлечения выталкивают отливку на приемный лоток.

#### *Литье втулок, колец, венцов из цветных сплавов.*

Для цветного литья применяют металлические и реже песчаные формы. Втулки небольших и средних размеров из медных сплавов отливают в формы, рабочая поверхность которых покрыта ацетиленовой сажей или графитовой крас-

кой. Форму перед заливкой нагревают до температуры не более 520 К. Однако, например, отливки из медных сплавов, склонных к ликвации (высокоцинковистые бронзы), во избежание ликвации отливают в режиме намораживания, при интенсивном охлаждении изложницы. Для получения качественных отливок из медных сплавов важно выдерживать определенную температуру заливки.

*Особенности изготовления толстостенных и длинномерных цилиндрических полых заготовок.*

Такие заготовки обычно изготавливают из стали, чугуна, медных сплавов. Отливки имеют диаметр более 1000 мм, толщину стенки до 300 мм, длину более 8000 мм и массу до 60 т. Это, например, пустотелые валки бумагоделательных машин, детали химических агрегатов, нефтяного и угольного машиностроения, гильзы крупных дизелей и т. п.

При изготовлении таких отливок возникает ряд проблем, главными из которых являются заполнение формы и получение отливок без литейных дефектов: продольных и поперечных усадочных трещин, рыхлот, неметаллических включений.

Для предотвращения дефектов в отливке, связанных с развитой поверхностью потока в форме, необходимо, чтобы заливочное устройство обеспечивало минимальные потери расплава теплоты и защиту его от окисления. Для этого используют литниковые устройства закрытого типа, обеспечивающие при литье заготовок из стали длиной до 10 м скорость нарастания толщины слоя расплава 2—3 см/мин. Поскольку из-за большой толщины стенки отливки гравитационный коэффициент на внешней поверхности значительно больше, чем на свободной, создается опасность появления напряжений в твердой корочке металла, затвердевающей на стенке изложницы. Это может привести к образованию продольных трещин в отливке. Поэтому для предотвращения трещин частоту вращения изложницы увеличивают постепенно, согласовывая скорость ее нарастания с затвердеванием отливки.

Усадка длинной отливки в продольном направлении велика (при усадке 1 % и длине отливки 10 м она составляет 10 см). Даже если форма не будет тормозить усадку, то только под действием собственной массы в отливке возникнут значительные напряжения трения ее о стенки изложницы. Для уменьшения опасности возникновения трещин в некоторых случаях «помогают» перемещению отлив-

ки при усадке вдоль ее оси путем подпрессовки с помощью специальных механизмов.

При изготовлении полых заготовок с большой толщиной стенки (100—300 мм) возникает проблема предотвращения образования фронта кристаллизации со стороны внутренней, свободной поверхности отливки. Это приводит к образованию дефектов усадочного происхождения в зоне стыка двух фронтов кристаллизации отливки, в связи с чем необходимо назначать очень большие припуски на обработку резанием по внутренней поверхности. Расположение усадочных дефектов в стенке отливки зависит от соотношения коэффициентов теплоотдачи от наружной и внутренней поверхностей. Устранить усадочные дефекты можно одновременным воздействием: охлаждением наружной поверхности отливки и утеплением, например слоем шлака (после заливки), свободной поверхности. Кроме перечисленных способов, применяют глухие торцовые крышки в форме, полностью экранирующие свободную поверхность отливок от потоков воздуха, что резко ограничивает конвективную теплоотдачу от свободной поверхности отливки. В центре передней крышки выполняется отверстие, к которому плотно примыкает стационарный литник заливочного устройства.

В практике центробежного литья однослойных и многослойных труб и заготовок применяют обработку расплавов флюсами. Такая обработка производится непосредственно в изложнице.

Синтетический флюс добавляют в расплав в виде легкоплавких или экзотермических смесей. Флюс защищает расплав от окисления, эффективно рафинирует его в форме от неметаллических включений и газов, утепляет отливку со стороны внутренней, свободной поверхности, создавая условия направленного затвердевания отливки. В результате улучшается качество макро- и микроструктуры, повышается плотность и механические свойства отливок.

#### **4.10. Непрерывное литье**

Впервые процесс непрерывного литья был разработан в СССР. Это был научно-технический прорыв в области металлургического производства. Реализация процесса позволила воедино соединить два основных металлургических производства: непрерывное литье слитков и последующую их непрерывную прокатку. Однако практическая реализация непрерывного литья в полном объеме была осуществлена в Японии.

Процесс непрерывного литья осуществляется следующим образом (рис. 4.25). Расплав из ковша 1 равномерно и непрерывно поступает в водоохлаждае-

мую металлическую форму-кристаллизатор 2. Частично затвердевшая часть 3 отливки (слитка, прутка, заготовки прямоугольного, квадратного сечения, трубы) непрерывно извлекается валками 4 или иными устройствами; если требуется, отливка разрезается на заготовки пилой 5.

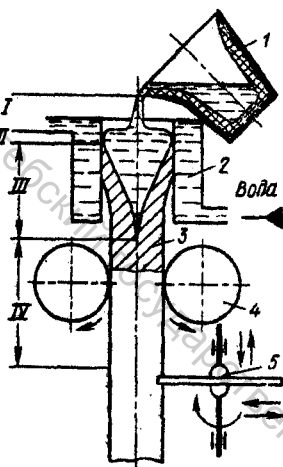


Рис. 4.25. Схема получения отливок при непрерывном литье (I-IV - температурные зоны слитка)

1 - ковш; 2 - форма-кристаллизатор; 3 - отливка; 4 - отрезная пила

(раковин, рыхлот, пористости). Таким образом, сущность процесса непрерывного литья заключается в возможности создания условий направленной кристаллизации и питания отливки.

Как правило, заготовки, полученные способом непрерывного литья, имеют плотное, без усадочных дефектов строение, малую ликвационную неоднородность и газосодержание, чистую поверхность, достаточно высокую точность размеров. Однако высокая скорость охлаждения расплава во многих случаях приводит к образованию значительных внутренних напряжений в отливках, а иногда к трещинам.

Наряду с указанными особенностями формирования отливки, способствующими повышению качества металла, техническая реализация процесса в про-

Особенности процесса формирования непрерывной отливки обусловлены тем, что в кристаллизаторе в разных его зонах по высоте или длине в каждый данный момент одновременно происходят все последовательные стадии охлаждения и затвердевания расплава (рис. 4.25): I — кристаллизатор заполняется расплавом; II — отвод тепла перегрева; III — кристаллизация; IV — охлаждение отливки. Высокая интенсивность охлаждения расплава способствует направленной его кристаллизации, уменьшению ликвационной неоднородности, неметаллических и газовых включений, а непрерывная подача расплава в верхнюю часть кристаллизующейся отливки — постоянному питанию фронта растущих кристаллов, устранению усадочных дефектов



изводстве показывает следующие преимущества этого способа литья: возможность получения отливки постоянного поперечного сечения, неограниченной длины; увеличение выхода годного металла путем уменьшения расхода на прибыли и донные части слитков; уменьшение расходов на изготовление изложниц и литейных форм; повышение качества металла, точности и улучшение поверхности отливок; автоматизацию процесса разлива расплава, возможность создания непрерывно действующих агрегатов для получения слитков и последующей их прокатки в профили или литых заготовок деталей машин и последующей их обработки вплоть до готового изделия; полное исключение трудоемких операций изготовления литейных форм, выбивки, обрубки, очистки отливок; устранение из литейного цеха формовочных и стержневых смесей и связанное с этим существенное улучшение условий труда и уменьшение вредного воздействия литейного процесса на окружающую среду.

Таким образом, непрерывное литье — это прогрессивный материало- и трудосберегающий технологический процесс, позволяющий повысить качество отливок, производительность и улучшить условия труда.

Однако непрерывное литье не позволяет получать отливки сложной конфигурации. Конфигурация изделия определяется возможностью его непрерывного извлечения из кристаллизатора. Расширение области применения этого прогрессивного процесса литья для машиностроительных деталей связано с необходимостью пересмотра устоявшихся конструктивных решений тех или иных деталей и узлов машин, разработки таких конструкций деталей, которые могли бы быть изготовлены этим способом.

Важнейшим технологическим параметром процесса непрерывного литья является интенсивность охлаждения расплава, определяющая скорость кристаллизации отливки и, соответственно, ее качество, а также производительность процесса. Увеличение скорости кристаллизации способствует созданию условий направленной кристаллизации и повышению качества литого металла, производительности установок.

Интенсивность отвода теплоты от расплава в кристаллизаторе ограничена тем, что, вследствие усадки отливки между кристаллизующейся корочкой металла и стенками кристаллизатора, образуется зазор, снижающий скорость отвода теплоты. Для устранения этого явления на определенном участке (по высоте) кристаллизатор делают с обратной конусностью. Однако при недостаточно точном

соблюдении температурных режимов литья и скорости вытягивания отливки обратная конусность повышает вероятность обрыва корочки металла, появления в ней надрывов и трещин. Для повышения интенсивности охлаждения отливки процесс осуществляют так, что в коротком кристаллизаторе формируется только корочка толщиной, достаточной для того, чтобы при ее извлечении из кристаллизатора не образовалось надрывов и трещин, а основное количество теплоты отводят погружением отливки в воду 2 в зоне вторичного охлаждения (рис. 4.26). Такую схему процесса используют для литья алюминиевых сплавов.

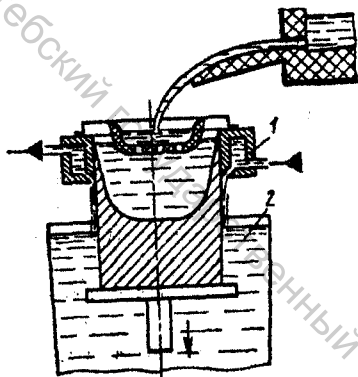


Рис. 4.26. Схема литья алюминиевых слитков в кристаллизаторе

Для литья фасонных профилей с отверстиями используют установки горизонтального типа с графитовым водоохлаждаемым кристаллизатором (рис. 4.27). В стенке раздаточной печи 1 устанавливают кристаллизаторы, состоящие из водоохлаждаемой рубашки 2, графитовых вкладышей 3 и стержня 4 с отверстиями 5 для прохода расплава. В начале процесса внутрь кристаллизатора вводят затравку-захват. В разогретую печь заливают расплав и после выдержки для формирования отливки в кристаллизаторе начинают извлекать ее из кристаллизатора за затравку-захват. По мере извлечения отливку разрезают на мерные заготовки. Таким способом из чугуна получают заготовки для деталей гидроаппаратуры, направляющих прессов и металлорежущих станков, а из медных сплавов – для втулок, гаек, корпусов гидро- и пневмоаппаратуры.

*Полунепрерывное литье труб и втулок из чугуна.*

При полунепрерывном литье труб (рис. 4.28.) в кристаллизатор 3 устанавливают водоохлаждаемый стержень 1 (с конусностью 0,4 %), формирующий от-

верстие в трубе. Перед началом заливки стол 6, на котором располагается стержень 5 с кольцевым пазом для захвата трубы, поднят.

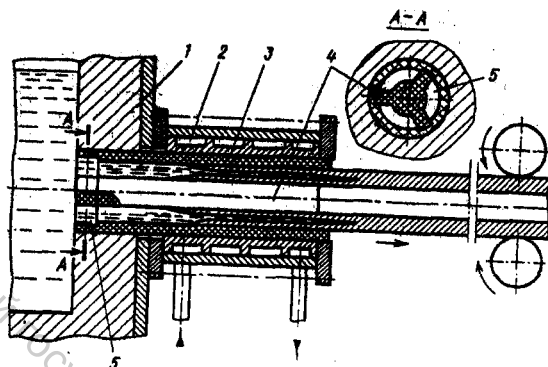


Рис. 4.27. Схема кристаллизатора для горизонтального непрерывного литья трубчатых заготовок

1 — раздаточная печь; 2 — водоохлаждаемая рубашка; 3 — графитовый вкладыш; 4 — стержень; 5 — отверстия

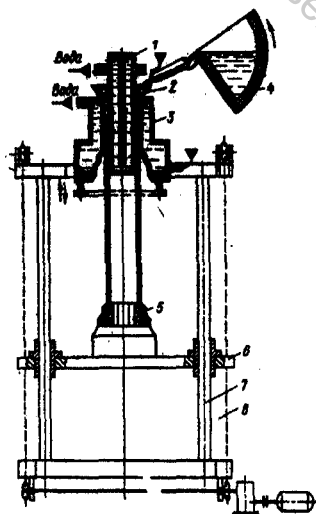


Рис. 4.28. Установка полунепрерывного литья труб

1 — водоохлаждаемый кристаллизатор; 2 — литниковая система; 3 — кристаллизатор; 4 — дозирующий ковш; 5 — стержень; 6 — стол; 7 — направляющая колонна; 8 — цепь

Жидкий чугун из автоматического дозирующего ковша 4 по литниковой системе 2, состоящей из лотка и чаши, подается в кристаллизатор. Через питатели в дне чаши расплав попадает между стенкой кристаллизатора и водоохлаждаемым металлическим стержнем. Когда уровень расплава в кристаллизаторе поднимается настолько, что до верхнего его края остается 25—30 мм, начинается вытягивание трубы, при этом расплав продолжает непрерывно поступать в кристаллизатор. Стол 6 машины перемещается по двум колоннам 7 с помощью цепей 8 или тросов.

Для устранения схватывания расплава со стенками кристаллизатора последний совершает возвратно-поступательное движение вдоль оси трубы. Это движение

выполняется по двухтактной схеме. Первый такт — опускание кристаллизатора со скоростью вытягивания трубы (относительного движения кристаллизатора и трубы не происходит); второй такт — подъем кристаллизатора в исходное положение со скоростью, в 2—3 раза большей скорости вытягивания. Частота движения зависит от диаметра трубы. По окончании литья труба специальным устройством (манипулятором) снимается со стола машины, стол возвращается в исходное положение, и цикл повторяется. Скорость вытягивания трубы внутренним диаметром 300 мм и длиной 10 м из кристаллизатора высотой 0,5 м составляет около 2,4 м/мин.

Трубы, полученные таким способом, имеют хорошую внутреннюю и наружную поверхности, мелкозернистую структуру, высокую плотность. Полупрерывным литьем можно изготавливать трубы диаметром до 1000 мм с толщиной стенки до 50 мм и длиной до 10 м. Подобным образом изготавливают втулки для гильз крупных дизелей.

#### **4.11. Электрошлаковое литье**

Получение заготовок деталей машин любым способом литья состоит в приготовлении металлического расплава и заливке его тем или иным способом в литейную форму. В процессе заливки и охлаждения в литейной форме расплав взаимодействует с газами воздуха и среды литейной формы, материалами, из которых она изготовлена. Указанные факторы, а также то, что не всегда удается полностью компенсировать усадку расплава при затвердевании, ухудшают свойства литого металла по сравнению с металлом, обработанным давлением. Однако заготовки, получаемые обработкой давлением, часто имеют значительно большие, чем отливки, припуски на обработку резанием. При использовании поковок для изготовления крупных деталей машин велики отходы металла в стружку.

##### *Сущность процесса*

Электрошлаковое литье — это способ получения фасонных отливок в водоохлаждаемой металлической литейной форме — кристаллизаторе, основанный на применении электрошлакового переплава расходуемого электрода.

Отливку получают переплавом электродов из металла, требуемого химического состава. Источником теплоты является шлаковая ванна, нагреваемая вследствие прохождения через нее электрического тока (рис. 4.29). В начале процесса в водоохлаждаемый медный кристаллизатор 6 заливают предварительно

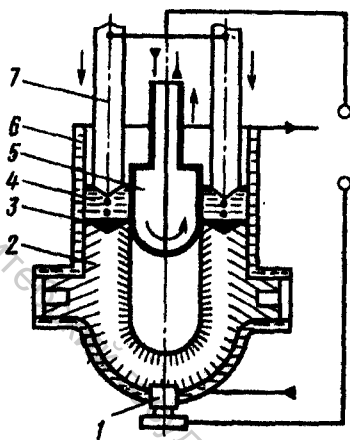


Рис. 4.29. Схема получения отливки электрошлаковым литьем

1 – затравка; 2 – отливка; 3 – металлическая ванна; 4 – шлак; 5 – металлический стержень; 6 – кристаллизатор; 7 – электроды

расплавленный шлак специального состава. Электрический ток подводится к переплавляемым электродам 7 и затравке 1 в нижней части кристаллизатора 6. Шлаковая ванна обладает малой электропроводностью, поэтому при прохождении через нее тока выделяется большое количество теплоты.

Шлаковая ванна нагревается до 1973 К и более, благодаря чему погруженные в нее концы электродов оплавляются. Капли расплавленного металла проходят через ванну шлака 4, собираются в зоне кристаллизации, образуя под слоем шлака металлическую ванну 3. Металлическая ванна непрерывно пополняется в

верхней части расплавом от плавящихся электродов и последовательно затвердевает в нижней части вследствие отвода теплоты через стенки кристаллизатора. Для получения отливки 2 электроды 7 по мере их оплавления и затвердевания отливки постепенно поднимаются вверх. Для образования полости в отливке доохлаждаемый металлический стержень 5 также перемещается вверх.

Таким образом, сущность процесса электрошлакового литья заключается в том, что приготовление расплава (плавка) совмещено по месту и времени с заполнением литейной формы: отливка последовательно наплавляется в форме.

Литейная форма при электрошлаковом литье выполняет две функции: служит устройством для приготовления расплава и для формирования отливки. Это позволяет использовать преимущества процесса электрошлакового литья для повышения качества металла отливок.

#### *Качество отливок*

При электрошлаковом литье качество отливок обусловлено особенностями формирования отливки. Перенос капель расплава с конца электрода через

шлаковую ванну, интенсивное взаимодействие расплава со шлаком, последовательная и направленная кристаллизация расплава при высокой интенсивности охлаждения способствуют удалению из расплава неметаллических включений и растворенных газов, получению плотного однородного кристаллического строения отливки.

На кристаллическое строение отливки существенное влияние оказывает направление тепловых потоков: основное количество теплоты отводится в осевом направлении. Переносу теплоты в радиальном направлении препятствует тонкая корочка малотеплопроводного шлака между отливкой и кристаллизатором. Основное количество теплоты подводится в верхнюю часть отливки расплавленным и перегретым электродным металлом, а высокий перегрев шлаковой ванны создает градиент температур в осевом направлении. В результате расплав кристаллизуется в осевом или радиально-осевом направлениях. Это способствует формированию в отливке столбчатых кристаллов, а благодаря осевой или радиально-осевой их направленности, непрерывному питанию растущих кристаллов в отливке исключаются усадочные дефекты, трещины, ликвационная неоднородность.

Химический состав металла в отливке по основным элементам практически не изменяется, но содержание кислорода и азота снижается в 1,5—2 раза, понижается концентрация серы и уменьшается в 2—3 раза загрязненность металла неметаллическими включениями. При этом неметаллические включения становятся мельче и равномерно распределяются в отливке. Особенности формирования отливки оказывают положительное влияние на механические свойства металла: улучшается микроструктура отливки, резко возрастают пластические свойства. Поэтому механические свойства отливок выше, чем поковок и проката из металла одинакового химического состава.

Поскольку отливка выплавляется в металлической форме, покрытой изнутри тонким слоем шлака, качество поверхности отливки получается высоким, отливка не требует очистки, а во многих случаях и обработки резанием.

Таким образом, при электрошлаковом литье отпадает необходимость в плавильных печах, приготовлении формовочных и стержневых смесей, формовке, литниковых системах и прибылях. Полученные отливки имеют поверхность высокого качества.

Вместе с тем, для изготовления отливки требуется достаточно сложная и дорогостоящая литейная форма, специальные заготовки— электроды из проката или предварительно отлитые.

Накопленный производственный опыт показывает, что наиболее выгодно использовать этот процесс для получения отливок из специальных сталей и сплавов и отливок ответственного назначения, к которым предъявляются повышенные требования по качеству металла, механическим свойствам.

Способом электрошлакового литья получают полые заготовки цилиндров, трубы круглого и овального сечений, корпуса задвижек запорной и регулирующей арматуры тепловых и атомных электростанций, сосуды сверхвысокого давления, коленчатые валы, шатуны и другие детали крупных судовых двигателей, прокатные валки, бандажи цементных печей, заготовки штамповочного и режущего инструмента и другие детали.

#### **4.12. Технологичность отливок**

##### **Формовка**

Конструкция отливки должна обеспечивать простое и удобное изготовление формы. Это условие разделяется на следующие, частные:

- 1) модель должна беспрепятственно извлекаться из формы;
- 2) стержни должны свободно формоваться в стержневых ящиках;
- 3) конфигурация и крепление стержней не должны препятствовать сборке формы.

##### **Устранение подрезок**

Для свободного извлечения модели из формы нужно, чтобы на поверхности модели не было подрезок— выступов или углублений, расположенных перпендикулярно или наклонно к направлению выемки, которые при извлечении модели срезают отформованные участки.

На рис. 4.30, а показана схема подрезки. Деталь имеет наклонные ребра. При извлечении модели (направление извлечения показано штриховкой, перпендикулярной к плоскости А—А разреза формы) ребра срезают участки формы, зачерченные на рисунке. Для устранения подрезки можно выполнить части модели, мешающие выемке, отъемными или выдвигаемыми. Перед извлечением модели эти части снимают или убирают внутрь модели, после чего модель выходит из формы. По другому способу модель изготавливают с заполнением подрезаемых участков; такая модель дает форму, изображенную на виде б. Требуемую конфигура-

цию получают установкой в форме закладных стержней после извлечения модели (вид в).

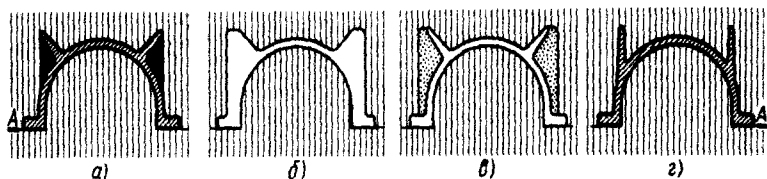


Рис. 4.30. Подрезы и способы их устранения

Все эти способы усложняют и удорожают формовку. Целесообразнее придать отливке конфигурацию, исключаящую подрезку. При расположении ребер параллельно направлению извлечения (вид з) модель беспрепятственно выходит из формы.

При конструировании отливки необходимо иметь ясное представление о расположении плоскости разреза и о положении детали в форме при заливке. Как правило, заготовки отливают ответственными поверхностями вниз, так как металл в нижних частях отливки получается более плотным и качественным, чем в верхних частях. Установив плоскость разреза, необходимо последовательно просмотреть все элементы конструкции и устранить подрезки.

Это сделать помогает правило теней. Надо представить себе, что деталь освещена лучами, нормальными к плоскости разреза (вид а). Затененные участки свидетельствуют о наличии подрезок.

На рис. 4.31, а—б представлены примеры подрезок при формовке бобышек (направление извлечения модели показано стрелками). Способы устранения подрезок показаны на виде б.

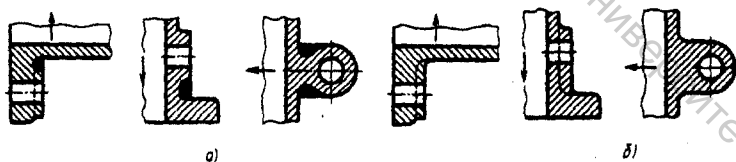


Рис. 4.31. Подрезы при формовке бобышек

Подрезы не всегда ясно просматриваются на чертеже и ускользают от внимания конструктора. Пример неявной подрезки приведен на рис. 4.32, а (узел показан в положении формовки; плоскость разреза обозначена буквой А).



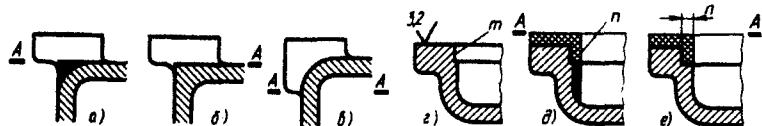


Рис. 4.32. Устранение подрезок

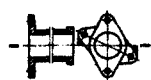
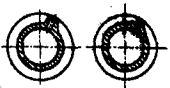
Таблица 4.2

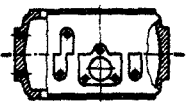
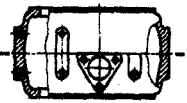
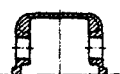
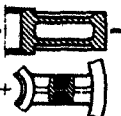
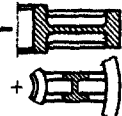
Примеры корректировки конструкций

Галтель коробки образует в нижней форме мертвый объем (зачерненный на рисунке). Отформовать этот угол можно, если продлить вертикальную стенку коробки до плоскости разреза (вид б) или перенести плоскость разреза на участок слияния галтели со стенкой; лапа в этом случае должна быть продолжена до плоскости разреза (вид в).

В конструкции чашечной детали (вид г) поверхность выточки  $m$  расположена слишком близко к смежной черной стенке. Предусматриваемый в модели припуск  $n$  на механическую обработку (вид д) образует подрезку (зачерненный участок). Ее можно ликвидировать, углубив выточку по отношению к черной поверхности на припуск  $n$  (вид е).

В табл. 4.2 приведены примеры подрезок в типовых машиностроительных отливках и способы их устранения.

| Исходная конструкция                                                                | Исправленная конструкция и способ устранения                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ручной маховичок                                                                    |                                                                                                                              |
|    | <br>Изменение конфигурации детали           |
| Патрубок                                                                            |                                                                                                                              |
|    | <br>Расположение осей фланцев под углом 90° |
| Трубчатая деталь                                                                    |                                                                                                                              |
|    | <br>Изменение конфигурации бобышки          |
| Корпус                                                                              |                                                                                                                              |
|  | <br>Расширение внутренней полости корпуса |
| Корпус                                                                              |                                                                                                                              |
|  | <br>Продление бобышек до дна корпуса      |

| Исходная конструкция                                                                                                                                                                                                                                                   | Исправленная конструкция и способ устранения | Исходная конструкция                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Исправленная конструкция и способ устранения |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <p>Корпус</p>   <p>Устранение фланца путем перехода с болтового крепления на крепление шпильками</p> |                                              | <p>Корпусная деталь с наружными бобышками и платиками</p>   <p>Продление бобышек до плоскости разреза</p>  <p>Изменение расположения бобышек</p> |                                              |
| <p>Корпус</p>   <p>Продление бобышек до потолка корпуса</p>                                          |                                              | <p>Корпусная деталь</p>   <p>Деталь изготовлена без нижнего фланца</p>                                                                                                                                                            |                                              |
| <p>Крыльчатка вентилятора</p>   <p>Устранение перекрытия лопастей</p>                                |                                              | <p>Корпусные детали с косыми и вафельными ребрами</p>   <p>Переход на прямые ребра</p>                                                                                                                                        |                                              |
| <p>Спицы маховика</p>   <p>Поворот двутаврового сечения спицы на 90°</p>                           |                                              | <p>Бобышки</p>                                                                                                                                                                                                                |                                              |

### Разъем форм

Следует избегать разъема форм по наклонным и ступенчатым плоскостям, осложняющего изготовление форм.

Для формовки рычага со смещенными плечами (рис. 4.33, а) требуется ступенчатый разъем. Формовка упрощается при расположении плеч в одной плоскости (вид б).

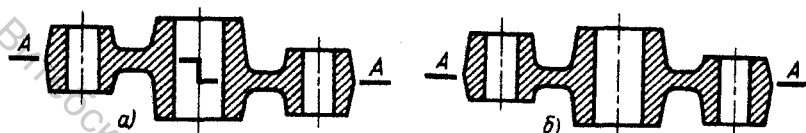


Рис. 4.33. Устранение ступенчатого разъема формы

Формовку криволинейного патрубка (рис. 4.34, а) можно упростить, выпрямив ось патрубка при незначительном изменении расположения привязочных точек патрубка (вид б), а при необходимости и с сохранением его (вид в).

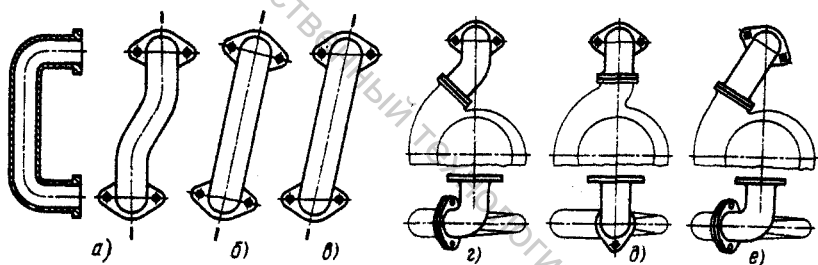


Рис. 4.34. Упрощение формовки криволинейных патрубков

На видах г—е приведен пример изменения конструкции выходного патрубка центробежного насоса. Наиболее целесообразна конструкция е, которая, наряду с упрощением литья, способствует уменьшению гидравлических потерь в насосе; вместо двух поворотов потока жидкости (как в конструкциях г, д), получается только один поворот.

### Формовка с применением стержней

Открытые отливки целесообразно формовать по моделям без применения стержней. В этом случае модели придают конфигурацию, точно соответствующую форме изделия. При заформовке модели получается негативный отпечаток полости. Непременное условие применения этого способа состоит в том, чтобы на внутренней поверхности детали не было подрезок.

На рис. 4.35, а схематически показан пример внутренней подрезки. Отливка имеет выступающий в полость фланец; при удалении модели болван повреждается.

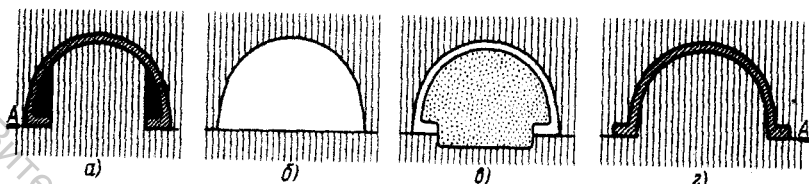


Рис. 4.35. Формовка внутренних полостей

При наличии внутренних подрезок единственный способ формирования полости состоит в применении стержней. Модель, выполняемая в данном случае массивной, оставляет в форме отпечаток, показанный на рис. 4.35, в. Внутреннюю полость образуют стержнем (вид в).

Отливку нетрудно перевести на бесстержневую формовку, расположив фланец снаружи (вид г).

На рис. 4.36 приведены примеры перевода типовых деталей на бесстержневую формовку.

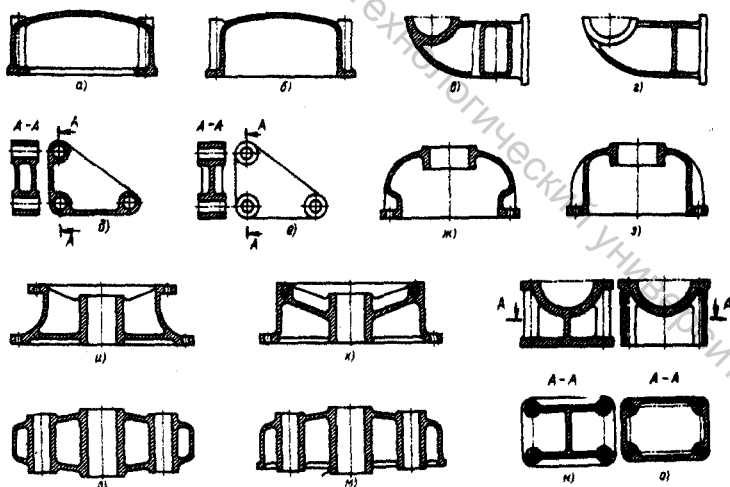


Рис. 4.36. Стержневая (а, в, д, ж, и, л, н) и бесстержневая (б, г, е, з, к, м, о) формовка; а, б – крышка; в, г – кронштейн; д, е – рычаг; ж, з – корпус; и, к – переходник; л, м – ротор; н, о – корпус подшипника

Формовка внутренних плоскостей с помощью болванов ограничивается предельной высотой болванов. При обычном составе формовочных смесей высоту нижних болванов рекомендуется делать  $H < 0,8S$ , а верхних (висячих) болванов  $h < 0,3s$ , где  $S$  и  $s$  — соответственно средние поперечники болванов (рис. 4.37). При упрочненных формах (формовочные смеси с бентонитом, с крепителями, поверхностно-подсушиваемые, химически твердеющие формы и т. д.), а также при машинной формовке высоту болванов можно увеличить на 30—50% против приведенных соотношений.

В конструкции литых заготовок не должно быть узких полостей, глубоких карманов малого сечения и т. д. (рис. 4.38, а, в). Такие полости плохо заполняются формовочной смесью; в форме они образуют непрочные столбчатые или ленточные выступы  $m$ , осыпавшиеся при извлечении модели и легко смываемые напором жидкого металла. Способы их устранения показаны на видах б, г.

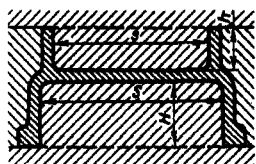


Рис. 4.37. К определению высоты болванов

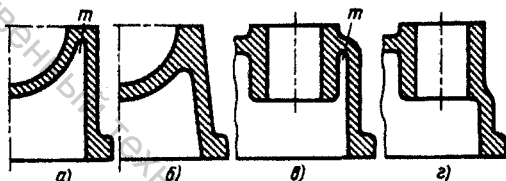


Рис. 4.38. Усиление внутренних элементов формы

В отливках с открытыми нижними полостями стержни устанавливают основанием в нижней опоке (рис. 4.39, а). Стержни, формирующие верхние полости подвешивают в верхней опоке за обратный конус (вид б) или с помощью проволоки (вид в), укрепляемой на брус, опирающемся на верхнюю опоку. Целесообразнее опирать верхний стержень на нижний через окно в горизонтальной стенке отливки (вид г).

В закрытых полостях стержни крепят на знаках, представляющих собой отформованные заодно со стержнем выступы, устанавливаемые в гнездах, образованных в форме соответствующими выступами на модели. По условиям собираемости знаки устанавливают в плоскости разъема формы (рис. 4.40, а) или перпендикулярно к ней (вид б).

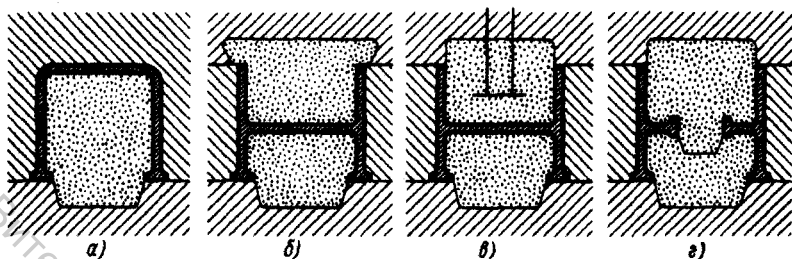


Рис. 4.39. Установка стержней

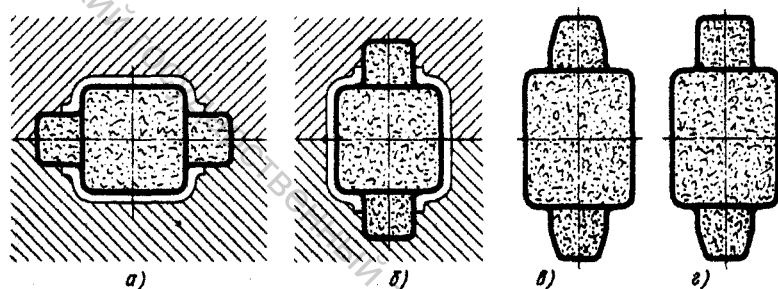


Рис. 4.40. Установка и разновидности знаков

Знаки выполняют цилиндрическими (виды а, б) или коническими (вид в). Последние обеспечивают более точную установку стержня в поперечном направлении, но осевая фиксация получается менее определенной, чем при цилиндрических знаках, упирающихся в гнезда формы торцами. Нередко применяют сочетание цилиндрических и конических знаков (вид г), причем цилиндрические знаки устанавливают с упором плоского торца в направлении осевой силы, действующей на стержень при заливке.

Для упрощения изготовления рекомендуется избегать галтелей на торцах отверстий детали (рис. 4.41, виды а), делая знак гладким (виды б).

Обычно для крепления знаков используют имеющиеся на детали отверстия. В отливках с замкнутыми внутренними полостями стержни крепят с помощью специальных знаков, выводимых через отверстия в стенках отливки. В готовом изделии отверстия могут оставаться открытыми, если это допустимо по функциональному назначению детали. Отверстия, портящие внешний вид детали, а также отверстия полостей, которые должны быть герметичны, заглушают.

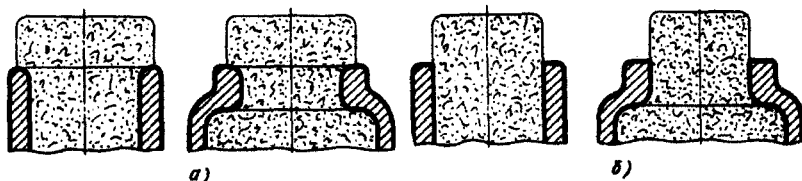


Рис. 4.41. Формы знаков

### 4.13. Рекомендации по проектированию отливок

#### Толщина и сопряжения стенок

Стенки литых деталей обладают неодинаковой прочностью в поперечном сечении из-за различия условий кристаллизации. Прочность максимальна в поверхностном слое, где металл, вследствие повышенной скорости охлаждения, приобретает мелкокристаллическую структуру и где образуются благоприятные для прочности остаточные напряжения сжатия. В поверхностном слое чугунов преобладают перлит и цементит. Сердцевина, застывающая медленнее, имеет крупнокристаллическое строение с преобладанием феррита и графита. В ней нередко образуются дендритные кристаллы и возникают усадочные раковины и рыхлоты.

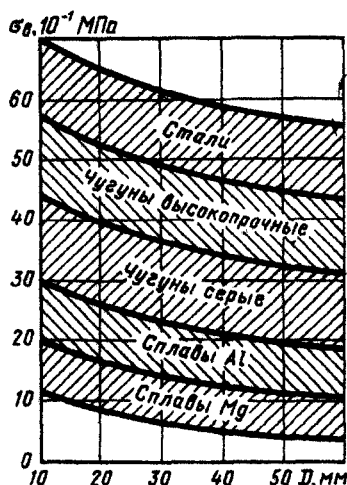


Рис. 4.42. Прочность литейных сплавов

Чем массивнее стенка, тем резче разница между прочностью сердцевины и корки, поэтому увеличение толщины стенок не сопровождается пропорциональным увеличением прочности отливки (рис. 4.42).

По этим причинам, а также для уменьшения массы целесообразно выполнять стенки отливок наименьшей толщины, которая допускается условиями литья. Необходимую жесткость и прочность обеспечивают ребрением, применением рациональных профилей, приданием отливке выпуклых, сводча-





Как правило, рекомендуется применять стенки наименьшей толщины, допускаемой условиями литья и прочностью детали.

На рис. 4.44 приведена минимальная толщина  $s$  стенок для различных литейных сплавов в зависимости от приведенного габаритного размера детали, вычисляемого по формуле

$$N = \frac{2l + b + h}{3}, \quad (4.6)$$

где  $l$  — длина;  $b$  — ширина;  $h$  — высота детали, мм.

График составлен для наружных стенок при литье в песчаные формы. Толщину внутренних стенок, перегородок и ребер делают в среднем на 20% меньше.

График может служить только для ориентировочной оценки толщины стенок. Допустимая толщина стенок сильно зависит от конфигурации отливки. Сложные отливки, формуемые в нескольких опоках с применением большого числа стержней, необходимо делать толстостенными. Большое влияние оказывает технология литья: состав формовочных и стержневых смесей, условия питания и охлаждения, устройство литниковой системы и др.

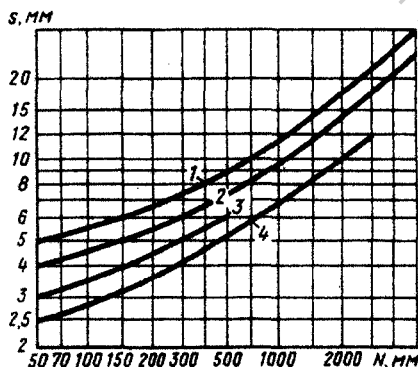


Рис. 4.44. Минимальные толщины стенок:

1 — стали; 2 — чугуны серые; 3 — бронза; 4 —  
алюминиевые сплавы

В тяжелонагруженных деталях (станины молотов, клетки прокатных станов и др.) толщина стенок определяется действующими нагрузками и условием жесткости конструкций и значительно превышает приведенные на рис. 4.44 значения. Однако и в данном случае целесообразно применять стенки наименьшей толщины, достигая необходимой прочности и жесткости отливки за счет рациональных форм.

Для одновременного затвердевания толщину внутренних стенок рекомендуется делать равной примерно  $0,8S$  (где  $S$  — толщина наружных стенок).

На рис. 4.45 а— г показаны типовые формы углового сопряжения стенок. При обычном сопряжении радиусами  $R=(1,5-2)s$ , описанными из одного центра (вид а), возможно утонение стенки на участке перехода вследствие смещения стержня. Лучше сопряжение радиусами, описанными из разных центров. Наружный радиус делают равным от 1 (вид б) до 0,7 (вид в) внутреннего радиуса. Для улучшения теплоотдачи, повышения жесткости и предупреждения усадочных трещин на сопряжениях малого радиуса полезно делать внутренние ребра (вид г).

Во всех случаях, когда позволяет конструкция, целесообразно применять максимальные радиусы переходов, допускаемые конфигурацией детали (вид д).

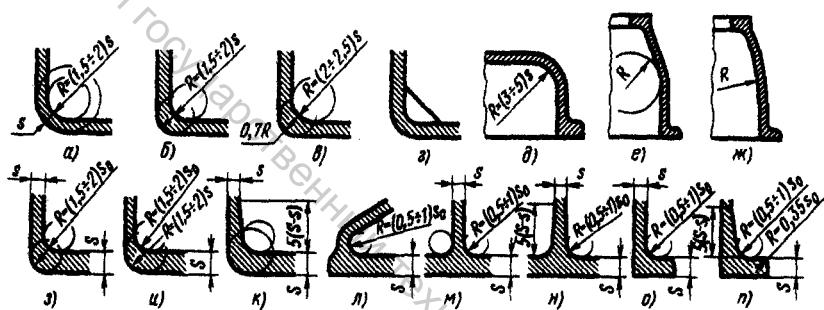


Рис. 4.45. Угловое сопряжение стенок

Стенки, сходящиеся под тупым углом (вид е), соединяют радиусами  $R = (50 - 100)s$ . Лучше в таких случаях применять криволинейные стенки, описанные одним большим радиусом (вид ж).

При определении минимальных радиусов сопряжения стенок различной толщины можно пользоваться приведенными выше соотношениями, заменив  $s$  средним арифметическим  $s_0 = 0,5 (S + s)$  толщин сопрягаемых стенок (виды з, и). При небольшой разнице можно принимать  $s_0 = S$ .

Стенки с большой разницей сечений целесообразно соединять клиновидным переходным участком длиной  $l \geq 5 (S - s)$  (вид к).

Следует избегать соединения стенок под острым углом (вид л). Если это неизбежно, то радиус сопряжения принимают не менее  $(0,5 \div 1)s_0$ .

На видах м, н показаны рекомендуемые соотношения для Т-образных сопряжений, на видах о, п — для сопряжений стенок с фланцами.

Стенки различной толщины (рис. 4.46, а) следует соединять клиновыми переходами с уклоном от 1:5 до 1:10 (виды б, в). Целесообразно усиливать участок перехода ребрами (вид г).

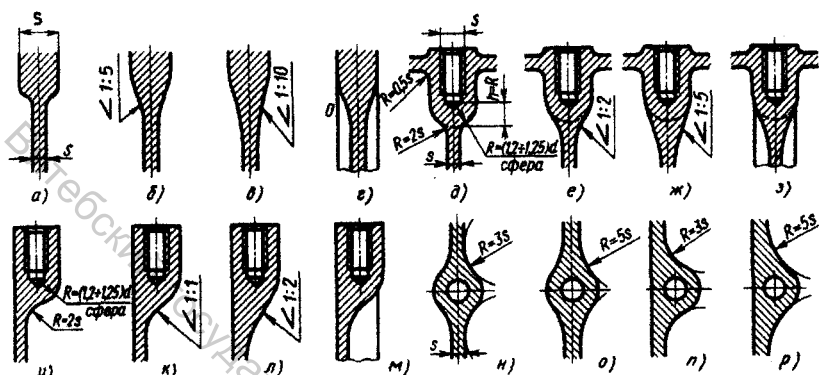


Рис. 4.46. Сопряжение участков отливки различной толщины

На видах д-р показаны формы сопряжения стенок с бобышками. В профильной проекции бобышки соединяют со стенками радиусами  $R = 2s$  (виды д, и) или уклонами от 1:1 до 1:5 (виды е, ж, к, л) с усилением ребрами (виды з, м). В плановой проекции сопряжения выполняют радиусами  $R = (3 + 5)s$  (виды н-р).

Найденные из приведенных ориентировочных соотношений радиусы округляют до ближайших стандартных размеров  $R = 1, 2, 3, 5, 8, 10, 15, 25, 30, 40$  мм. Так как небольшое изменение радиусов сопряжений мало влияет на качество отливки, то рекомендуется унифицировать радиусы.

Преобладающий радиус переходов на чертеже детали обычно не просят указывать, указывая его на поле чертежа (в технических требованиях) надписью: «Неуказанные радиусы 6 мм».

Для закругленных внешних углов преобладающий радиус указывают надписью: «Неуказанные наружные галтели R3».

На рис. 4.47 представлены примеры устранения массивных частей отливки (массивов) (обозначены буквой *т*) на крепежных фланцах (виды а-в), планках (виды г-е), в корпусной детали (виды ж-и), в отливке блочной рубашки двигателя (виды к, л).

На участках, где массивы неизбежны, следует технологически обеспечивать ускоренное охлаждение.

Полезно развивать поверхность соприкосновения с формовочной смесью путем оребрения стенок. Для улучшения заполнения формы следует усиливать связь массивных элементов с ближайшими стенками с помощью галтелей (рис. 4.48, а), клиновых переходов (вид б), раструбов (вид в) и ребер (виды г, д). Целесообразно применять гофрированные (вид е) и коробчатые (вид ж) стенки. Помимо улучшения условий литья, эти сопряжения увеличивают жесткость и прочность отливки.

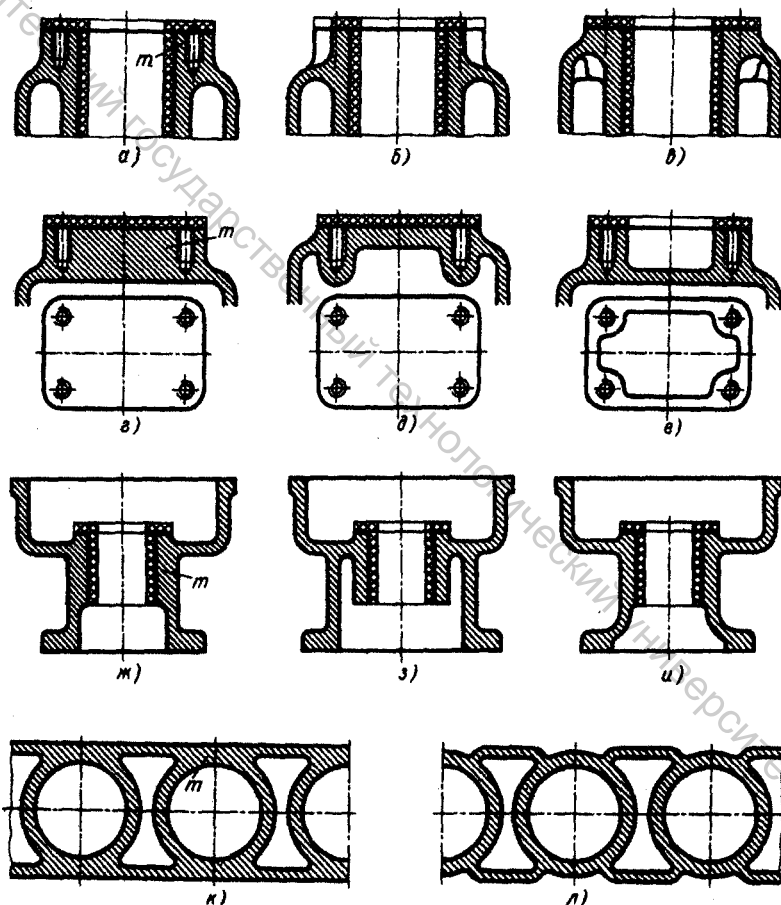


Рис. 4.47. Примеры устранения массивных элементов отливки

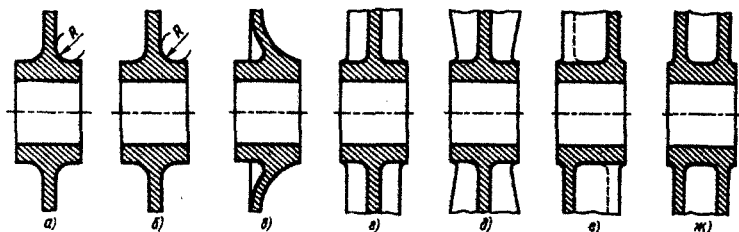


Рис. 4.48. Усиление участков сопряжений с бобышками

### Ребра

Для увеличения жесткости и прочности литых деталей и, как следствие, улучшения качества отливки применяют ребрение. Целесообразное расположение ребер позволяет улучшить питание элементов отливок и предупредить возникновение усадочных раковин и внутренних напряжений.

На рис. 4.49 показаны формы ребер. Ребра, расположенные в плоскости, перпендикулярной к направлению разъема формы, следует выполнять с литейным уклоном.

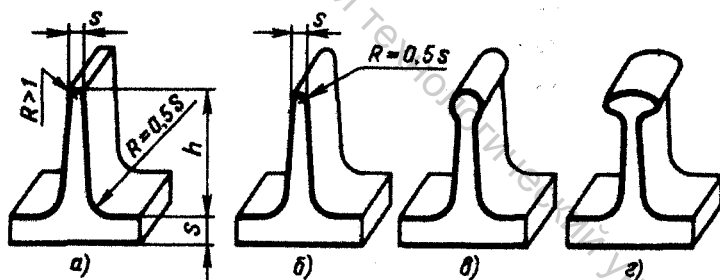


Рис. 4.49. Формы ребер

Основным размером ребра является толщина  $s$  у верхушки (вид а). Для ребер высотой 20—80 мм существующие нормы уклонов дают практически одинаковое, почти независимое от высоты утолщение ребра к основанию на 2—3 мм (на обе стороны ребра).

У верхушки ребер обязательны галтели радиусом не менее 1 мм. Верхушки ребер толщиной менее 6—8 мм закругляют радиусом  $R = 0,5s$  (вид б). Основание ребер соединяют со стенкой галтелями радиусом  $R \approx 0,5S$ .

По прочности целесообразнее ребра с утолщенными верхушками — бульбовые (вид в) и тавровые (вид г). Формовка таких ребер требует применения стержней.

Низкие, тонкие и редко расположенные ребра уменьшают момент сопротивления сечения изгибу и снижают прочность детали, хотя и повышают жесткость. Избежать ослабления можно более частым расположением ребер. Максимальный шаг, при котором не наступает ослабления, определяют из выражения

$$t = 2s_{\text{ср}} \left( \frac{h}{S} \right)^2, \quad (4.7)$$

где  $s_{\text{ср}}$  и  $h$  — соответственно средняя толщина и высота ребра;  $S$  — толщина стенки.

Практически ребра делают высотой, равной  $(3 \div 6) S$ . Более низкие ребра ослабляют деталь, не увеличивая существенно ее жесткости, более высокие — плохо отливаются.

На рис. 4.50 приведены примеры нецелесообразного и целесообразного выполнения ребер. Конструкция кронштейна (вид 1) невыгодна: ребро работает на растяжение. В конструкции 2 ребро работает на сжатие.

Ребрам следует придавать наиболее простые формы. Вогнутые ребра (вид 3) нецелесообразны по прочности; при работе на изгиб и растяжение в них возникают высокие напряжения, пропорциональные степени вогнутости. Ребра выпуклого профиля (вид 4) неэстетичны и утяжеляют деталь. Лучше всего применять прямолинейные ребра (вид 5), наиболее прочные при работе на растяжение-сжатие и изгиб.

В деталях, работающих на изгиб, рекомендуется избегать соединения ребра со стенкой в плоскости, где изгибающий момент имеет большую величину (вид 6), так как момент сопротивления сечения в плоскости А—А слияния ребра со стенкой понижен. Лучше подводить ребра до края детали (в область наименьших значений изгибающего момента), присоединяя их к поясам жесткости (вид 7).

Во избежание ослабления следует не применять механическую обработку ребер. Конструкция плиты с вафельным внутренним оребрением (вид 8) неправильна. Ребра выведены на обрабатываемую плоскость плиты; при механической

обработке вершины ребер срезаются. В правильной конструкции ребра расположены ниже обрабатываемой поверхности (вид 9).

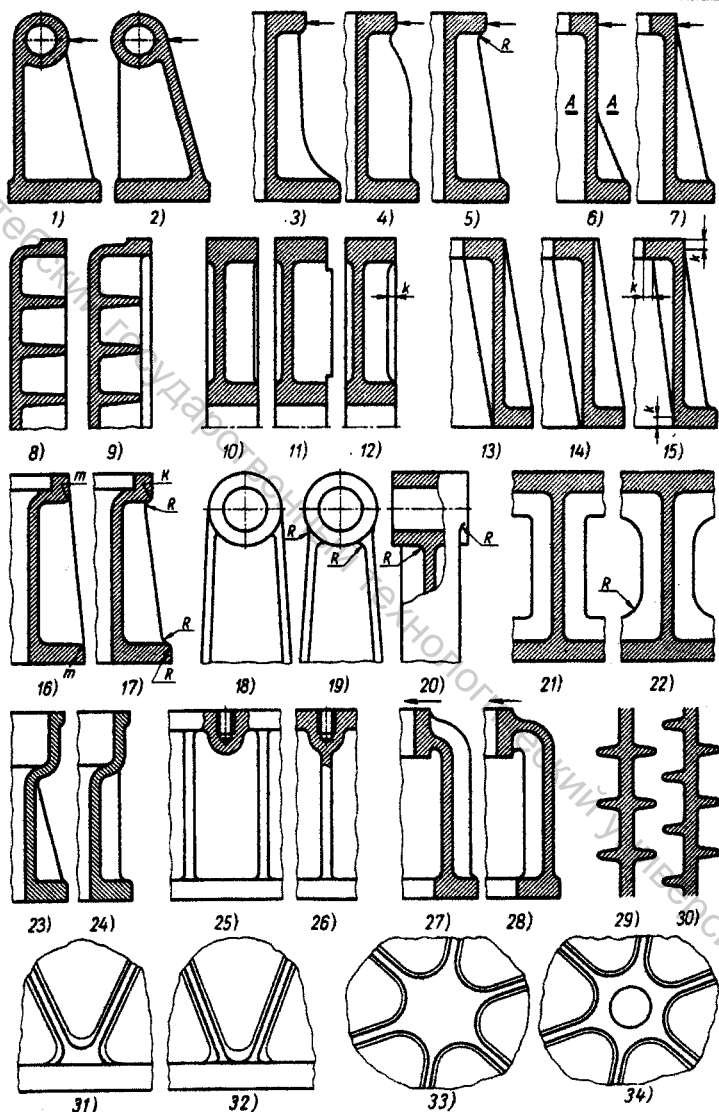


Рис. 4.50. Рекомендуемые конструкции ребер

Следует предупреждать возможность подрезки ребер, примыкающих к поверхностям, подвергаемым механической обработке. В конструкциях 10, 13 ребра расположены слишком близко к обрабатываемой поверхности, в результате производственных отклонений возможна подрезка ребер (виды 11, 14). Ребра должны быть расположены ниже обрабатываемой поверхности (виды 12, 15) на величину  $k = 3 \div 6$  мм.

Не рекомендуется выводить ребра на необрабатываемую поверхность фланцев (вид 16), так как на участках слияния ребер затрудняется формовка. Целесообразно располагать ребра ниже необрабатываемых поверхностей на величину  $R$ , равную радиусу закругления фланцев (вид 17).

Участки перехода ребер в тело детали (вид 18) следует выполнять радиусами  $R$  не менее 3-6 мм (виды 19, 20).

Ребра, соединяющиеся под углом (вид 21), следует сопрягать плавными переходами (вид 22).

Как правило, ребра следует подводить к узлам жесткости — участкам изменения направления стенок (вид 24) и крепежным узлам (вид 26). Конструкции 23, 25 не рекомендуются.

В деталях оболочковой формы (вид 27), работающих на изгиб, выгоднее применять внутренние ребра (вид 28), так как в данном случае большая часть изгибающей нагрузки воспринимается сжатыми ребрами (на стороне, ближайшей к направлению действия изгибающей силы). Внутреннее оребрение позволяет в тех же габаритах увеличить радиальные размеры стенок и получить благодаря этому значительный выигрыш в жесткости и прочности. Кроме того, улучшается внешний вид детали и облегчается уход за изделием.

При двустороннем оребрении (вид 29) рекомендуется во избежание местных скоплений металла, а также для уменьшения усадочных напряжений располагать ребра в шахматном порядке (вид 30).

Следует устранять скопления металла при сопряжении ребер со стенками под углом (вид 31) путем разноски ребер (вид 32). Массивы на участках встречи нескольких ребер (вид 33) устраняют с помощью кольцевого сочленения (вид 34).

В деталях, подвергающихся при работе неравномерному нагреву, ребра испытывают термические напряжения. Если стенки детали (рис. 4.51, а) нагрева-



ются сильнее, чем ребра, то в ребрах возникают напряжения растяжения. Ребра, имеющие более высокую температуру, чем стенки, подвергаются сжатию.

Для уменьшения термических напряжений целесообразно заменять прямые радиальные ребра (вид а) податливыми: тангенциальными (вид б), спиральными (вид в), вафельными (вид г).

На рис. 4.52, а—е представлены типы оребрения повышенной податливости. Такие ребра хорошо формуются лишь на плоских поверхностях или на поверхностях небольшой кривизны, параллельных плоскости разреза формы. Формовать такие ребра на криволинейных поверхностях и на телах вращения трудно.

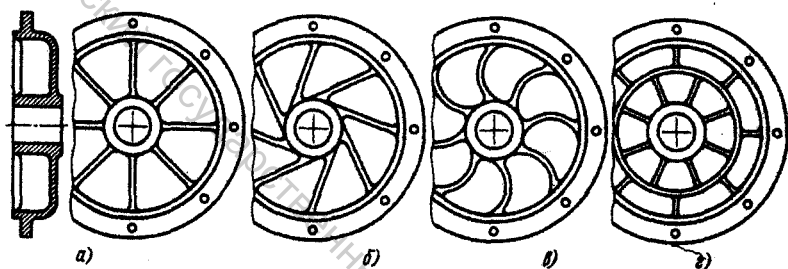


Рис. 4.51. Податливые ребра

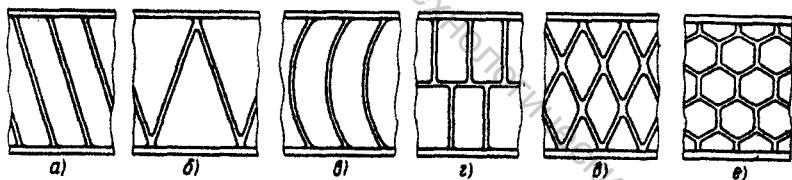


Рис. 4.52. Формы податливых ребер на плоских поверхностях

#### Ранты

Внешние обводы литых деталей рекомендуется снабжать рантами (рис. 4.53 а, б) с целью увеличения жесткости, повышения равномерности застывания и предотвращения отбела чугуна.

У стыкуемых по торцам деталей (вид в) ранты способствуют равномерному распределению сил затяжки. При наличии рантов легче зачистить неровности и уступы, образующиеся на стыках вследствие неточности литья, и добиться совпадения наружных контуров стыков.

Как правило, следует снабжать окантовками облегчающие и технологические отверстия в стенках (виды *г, д*) для повышения прочности и улучшения условий охлаждения отливки. Ориентировочные размеры рантов приведены на видах *а, з*.

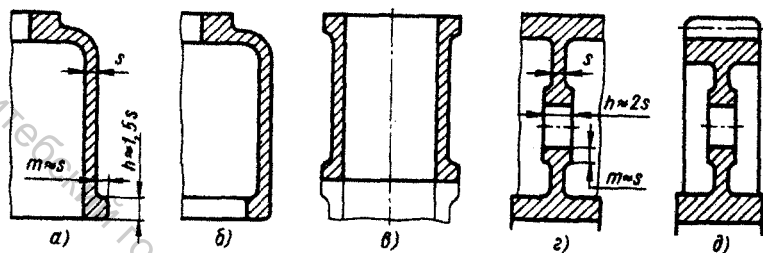


Рис. 4.53. Окантовка кромок

Фланцы

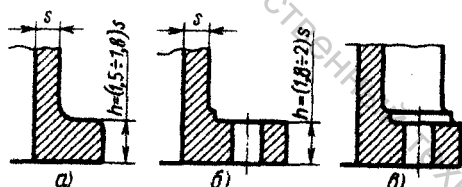


Рис. 4.54. К определению толщины фланцев

Толщину фланцев, обрабатываемых с одной стороны (рис. 4.54, *а*), делают в среднем равной  $(1,5—1,8)s$ ; толщину фланцев, обрабатываемых с двух сторон (вид *б*), —  $(1,8-2)s$ , где  $s$  — толщина прилегающей стенки.

Для повышения прочности и жесткости фланцы соединяют со стенками ребрами (вид *в*) или придают фланцам коробчатые формы.

Способы устранения массивов во фланцах увеличенной высоты показаны на рис. 4.55, *а — в*.

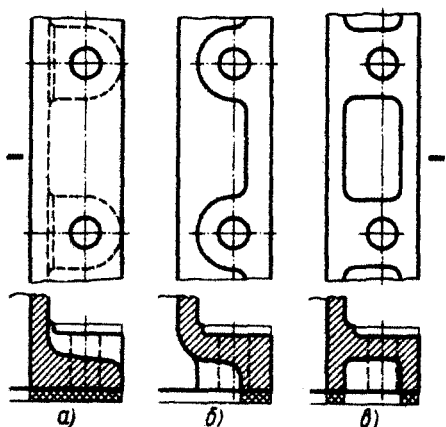


Рис. 4.55. Устранение массивных элементов во фланцах

## Отверстия

Следует избегать выполнения в отливках отверстий малого диаметра и большой длины.

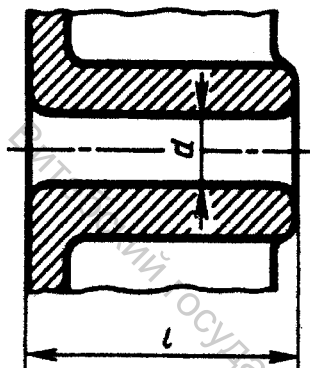


Рис. 4.56. К определению диаметра литых отверстий

Для ориентировочного определения минимального диаметра отверстий можно пользоваться формулой  $d = d_0 + 0,1l$ , где  $l$  — длина отверстия, мм;  $d_0$  — минимальный диаметр для тонкостенных деталей (рис. 4.56). Для алюминиевых сплавов и бронз  $d_0 = 5$ ; для чугунов  $d_0 = 7$ ; для сталей  $d_0 = 10$  мм. Отверстия меньшего диаметра следует сверлить. Длинные отверстия (типа масляных каналов) лучше выполнять сверлением, заливкой трубок или заменять их трубчатыми съемными магистралями.

Конфигурация литых масляных каналов и маслосодержащих полостей должна допускать полную очистку поверхностей от литейного пригара, песка и прочих засорений. После тщательной зачистки поверхности необходимо покрывать маслом и температуростойкими составами (бакелитом, силоксановыми эмалями).

## Усадка

Усадкой называют сокращение размеров отливки при остывании. Линейная усадка (%) равна

$$\frac{L - L_0}{L_0} = \alpha(t_c - t_0)100\%, \quad (4.8)$$

где  $L$  — размер отливки при температуре  $t_c$  затвердевания металла (точка солидуса);  $L_0$  — размер после остывания до цеховой температуры  $t_0$ ;  $\alpha$  — среднее значение коэффициента линейного расширения металла в интервале температур  $t_c - t_0$ .

Коэффициент линейного расширения имеет характерную для каждого металла величину, несколько уменьшается с понижением температуры и скачкообразно изменяется при фазовых превращениях в процессе остывания.

Объемная усадка характеризует изменение (%) объема отливки при остывании. На основании выражения (4.8)

$$\frac{V - V_0}{V_0} = \left( \frac{L}{L_0} \right)^3 - 1 = [1 + \alpha(t_c - t_0)]^3 - 1 \approx 3\alpha(t_c - t_0), \quad (4.9)$$

т. е. объемная усадка приблизительно в 3 раза больше линейной.

Усадка является одним из основных показателей литейных качеств материала и, наряду с другими свойствами (жидкотекучесть, теплоемкость, теплопроводность, окисляемость, склонность к образованию ликватов), определяет пригодность металла к литью.

Чем меньше усадка, тем больше точность размеров отливки и тем меньше опасность появления усадочных напряжений, раковин, трещин и коробления отливки.

Линейная усадка основных литейных сплавов имеет следующие значения:

| Приведенные показатели                                                                                                                                                                                                                        | Материал:                                  | Линейная усадка, % |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|
| относятся к случаю свободной усадки; их определяют на образцах, отлитых в открытые горизонтальные формы. Фактическая усадка зависит от сопротивления, оказываемого внутренними частями формы сокращению размеров отливки (стесненная усадка). | Чугуны фосфористые.....                    | 0,7-0,8            |
|                                                                                                                                                                                                                                               | Чугуны серые.....                          | 1-1,2              |
|                                                                                                                                                                                                                                               | Чугуны высокопрочные.....                  | 1,5-1,8            |
|                                                                                                                                                                                                                                               | Стали углеродистые.....                    | 1,8-2              |
|                                                                                                                                                                                                                                               | Стали легированные.....                    | 1,8-2,5            |
|                                                                                                                                                                                                                                               | Бронзы фосфористые.....                    | 0,6-0,8            |
|                                                                                                                                                                                                                                               | Бронзы оловянные.....                      | 1,3-1,6            |
|                                                                                                                                                                                                                                               | Бронзы алюминиевые.....                    | 2-2,2              |
|                                                                                                                                                                                                                                               | Алюминиево-медные сплавы.....              | 1,4-1,5            |
|                                                                                                                                                                                                                                               | Алюминиево-магниево-кремниевые сплавы..... | 1,2-1,3            |
| При жестких стержнях усадка может уменьшиться на 30—50% по сравнению со свободной усадкой, но при этом в стенках отливки возникают повышенные усадочные напряжения.                                                                           | Алюминиево-кремниевые сплавы..             | 1-1,2              |
|                                                                                                                                                                                                                                               | Магниево-алюминиевые сплавы.....           | 1,5-1,7            |

Усадку учитывают корректировкой размеров формы, пользуясь при изготовлении моделей и стержневых ящиков усадочными метрами с размерами, увеличенными по сравнению с нормальными на величину усадки.

#### Формовочные уклоны

Для облегчения выемки модели из формы поверхностям, перпендикулярным к плоскости разреза, придают формовочные (литейные) уклоны. В табл. 4.3

приведены стандартные уклоны в зависимости от высоты  $h$  поверхности над плоскостью разреза и соответствующее поперечное смещение крайних точек поверхности  $h \operatorname{tg} \alpha$ .

Таблица 4.3

Стандартные формовочные уклоны

| Высота над поверхностью разреза | Угол наклона стенки $\alpha$ | Уклон ( $\operatorname{tg} \alpha$ ) | $h \operatorname{tg} \alpha$ , мм | Высота над поверхностью разреза | Угол наклона стенки $\alpha$ | Уклон ( $\operatorname{tg} \alpha$ ) | $h \operatorname{tg} \alpha$ , мм |
|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| До 20                           | $3^\circ$                    | 0,052                                | До 1                              | 200-800                         | 30                           | 0,010                                | 2 - 8                             |
| 20-50                           | $1^\circ 30'$                | 0,026                                | 0,5-1,25                          | 800-2000                        | 20                           | 0,006                                | 5 - 12                            |
| 50-100                          | $1^\circ$                    | 0,0175                               | 0,9-1,8                           | Более 2000                      | 15                           | 0,004                                | Более 8                           |
| 100-200                         | 45                           | 0,013                                | 1,3-2,6                           |                                 |                              |                                      |                                   |

Величину стандартных уклонов на чертежах не проставляют, и детали вычерчивают без уклонов. Однако уклоны следует учитывать, особенно при конструировании деталей, имеющих большую высоту (в направлении, перпендикулярном к плоскости разреза).

В цилиндрической детали (рис. 4.57, а) фланец obtачивается до диаметра 560 мм, т. е. на 10 мм больше диаметра необработанной поверхности  $\varnothing 550$  мм.

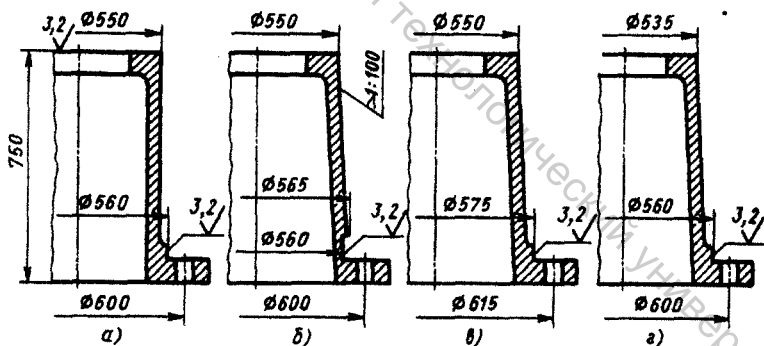


Рис. 4.57. Влияние литейных уклонов на конструкцию

Такая конфигурация невыполнима, так как при стандартном уклоне (1: 100) диаметр необработанной поверхности у основания цилиндра равен  $550 + 2.750 \cdot 0,01 = 565$  мм и инструмент врезается в стенку (вид б). Необходимо или увеличить диаметр обрабатываемой поверхности до 575 мм, что влечет за собой увеличение диаметра расположения болтов с 600 до 615 мм (вид в), или (если

конфигурация фланца задана) уменьшить диаметр верхней части цилиндра до 535 мм (вид г).

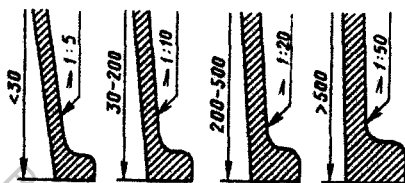


Рис. 4.58. Стандартные конструктивные уклоны

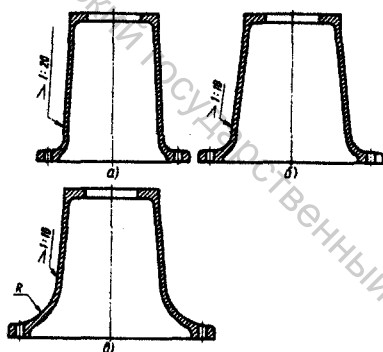


Рис. 4.59. Формы литых деталей

#### Упрощение формы отливок

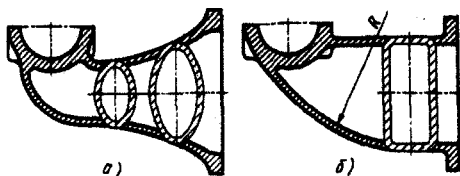


Рис. 4.60. Упрощение формы литых деталей

На чертежах крупногабаритных отливок целесообразно указывать уклон или предпочтительнее предусматривать конструктивные уклоны, превышающие формовочные уклоны. Придерживаться стандартных конструктивных уклонов (рис. 4.58) необязательно.

Форму детали следует определять, исходя из условия максимальной прочности, жесткости и дизайна, с учетом условий формовки, литья и механической обработки.

Примеры оформления литой детали в порядке возрастающей жесткости и улучшения условий литья показаны на рис. 4.59, а—в.

Для удешевления производства и повышения точности отливки следует всемерно упрощать форму отливок. Контуры деталей и внутренних полостей рекомендуется образовывать простейшими линиями — прямыми, дугами окружности и т.д.

Кронштейн, изображенный на рис. 4.60, а, имеет неоправданно сложные продольный и поперечный профили. Образование переходов между сечениями сложно; выдержать одинаковые переходы в модели и стержневом ящике трудно,

поэтому неизбежна разностенность отливки. В целесообразной конструкции (б) сечениям придана простая прямоугольная форма.

#### Расчленение отливок

Крупные и сложные литые детали целесообразно разделять на части. В корпусе вертикального редуктора (рис. 4.61, а) из-за уклона на днище требуется отливка в наружных стержнях. При разделении (вид б) части корпуса приобретают простую форму открытых отливок, формируемых без стержней.

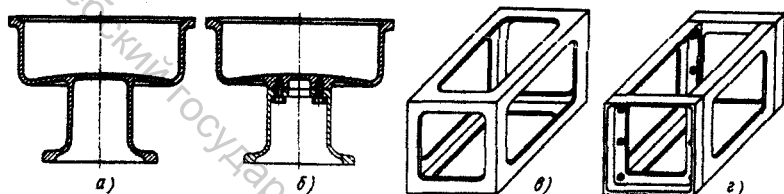


Рис. 4.61. Расчленение отливок

На видах в, г показан пример разделения рамной станины на плоские рамы простой формы.

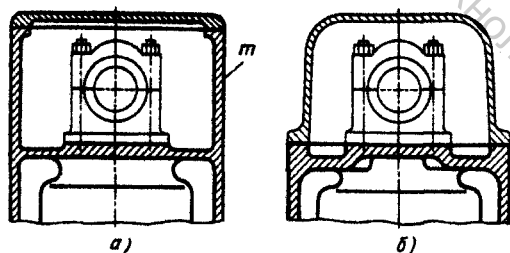


Рис. 4.62. Упрощение отливок

В узлах, состоящих из нескольких литых деталей, рекомендуется упрощать отливку наиболее сложной и крупной детали, несколько усложняя более простую из стыкуемых деталей. В конструкции блока двигателя внутреннего сгорания (рис. 4.62, а) объединение стенок *т* с крышкой (вид б) значительно упрощает отливку и механическую обработку блока и облегчает подход к механизмам распределения.

Выступающие части корпусных деталей (рис. 4.63, а) рекомендуется делать съемными (вид б)

На рис. 4.64 приведен пример упрощения стальной отливки (вид а) путем применения сварно-литой конструкции (вид б).

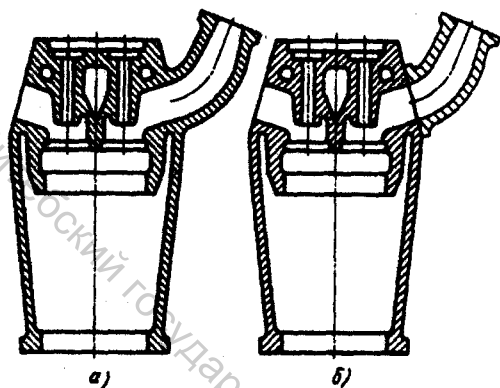


Рис. 4.63. Упрощение отливок

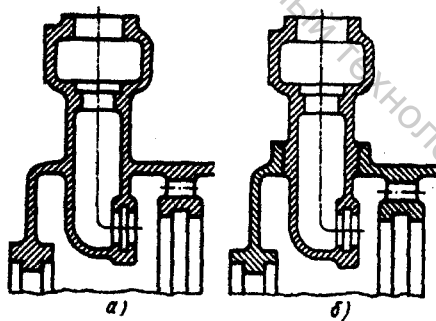


Рис. 4.64. Цельнолитая и сварно-литая конструкции

При малом масштабе производства сварка является оптимальным процессом при формировании сборно-сварных заготовок для сложных деталей. Некоторые сложные по конфигурации машиностроительные детали часто конструируются сварными, а в технических условиях вносится примечание: «Допускается применять литую заготовку».

В результате эти детали после прохождения всех стадий досерийного освоения и необходимой программы испытаний нового изделия узакониваются сварными, так как замена их литыми деталями вызывает необходимость в повторении программы дорогостоящих испытаний с измененными деталями.

Применение сварных заготовок для серийного производства в большинстве случаев экономически нецелесообразно, так как изготовление заготовок осуществляется по многоциклового технологическому маршруту.



## 5. СВАРКА ЗАГОТОВОК

Сварка – технологический процесс получения неразъемного соединения твердых материалов в результате действия межатомных сил. Современные способы сварки можно разделить на следующие группы: сварка плавлением (дуговая, лазерная, электрошлаковая, газовая и др.); сварка давлением (холодная, диффузионная, ультразвуковая, сварка трением, сварка прокаткой, сварка взрывом и др.); контактная сварка (точечная, шовная, стыковая и др.)

### СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ

#### 5.1. Дуговая сварка

Дуга представляет собой мощный электрический разряд в сильно ионизированной среде, сопровождающийся большим выделением теплоты и света. Зажигание дуги производится кратковременным соприкосновением электрода с изделием. В момент короткого замыкания сварочной цепи происходит быстрый разогрев места контакта электрода с изделием. Нагрев конца электрода и металла изделия при протекании тока сопровождается образованием ионизированных паров металла и компонентов покрытия электрода. После отрыва электрода от изделия устанавливается дуговой разряд. Необходимым условием возбуждения дуги в момент отрыва электрода является обеспечение быстрого подъема напряжения источником питания до 20 – 25 В. Зазор между электродом и металлом не должен превышать 4 – 5 мм, иначе дуга прервется.

*Ручная дуговая сварка.* Основными параметрами режима ручной дуговой сварки являются: сила сварочного тока, напряжение дуги и скорость сварки. Тип электрода определяют в зависимости от химического состава свариваемого металла, согласно паспортным данным изготовителя электродов, руководствуясь каталогами на электроды. Диаметр электрода выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла (табл. 5.1).

Таблица 5.1.

Соотношение между толщиной материала и диаметром электрода для ручной дуговой сварки

|                   |            |       |       |        |         |         |
|-------------------|------------|-------|-------|--------|---------|---------|
| Толщина металла   | мм         | 1 - 2 | 3 - 5 | 4 - 10 | 12 - 24 | 30 - 60 |
| Диаметр электрода | $d_3$ , мм | 2 - 3 | 3 - 4 | 4 - 5  | 5 - 6   | 6 - 8   |

Силу сварочного тока  $I_{св}$  выбирают в зависимости от типа сварочных соединений, марки и толщины металла, положения шва в пространстве (табл. 5.2).

Таблица 5.2.

Соотношение между силой сварочного тока и диаметром электрода для различных соединений

| Соединение  |           |             |           |              |           |
|-------------|-----------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| стыковое    |           | тавровое    |           | нахлесточное |           |
| $I_{св}, A$ | $d_э, мм$ | $I_{св}, A$ | $d_э, мм$ | $I_{св}, A$  | $d_э, мм$ |
| 25 - 35     | 2         | 30 - 50     | 2         | 30 - 50      | 2,5       |
| 35 - 50     | 2         | 40 - 70     | 2 - 2,5   | 45 - 75      | 2,5       |
| 45 - 70     | 2,5       | 50 - 80     | 2,5 - 3   | 55 - 85      | 2,5 - 3   |
| 120 - 160   | 3 - 4     | 120 - 160   | 3 - 4     | 120 - 160    | 3 - 4     |
| 130 - 180   | 3 - 4     | 130 - 180   | 4         | 130 - 180    | 4         |
| 140 - 220   | 4 - 5     | 150 - 220   | 4 - 5     | 150 - 220    | 4 - 5     |
| 160 - 250   | 4 - 5     | 160 - 250   | 4 - 5     | 160 - 250    | 4 - 5     |
| 160 - 340   | 4 - 6     | 160 - 340   | 4 - 6     | 160 - 340    | 4 - 6     |

Напряжение дуги изменяется в сравнительно узких пределах и выбирается на основании рекомендаций технической документации для данной марки электрода. Скорость сварки обычно выбирают с учетом необходимости получения слоя наплавленного металла, имеющего определенную площадь поперечного сечения.

Для ручной дуговой сварки применяют электроды, представляющие собой стержни из сварочной проволоки с электродным покрытием. Покрытие наносят с целью поддержания устойчивого горения дуги; защиты зоны сварочной дуги от воздействия кислорода и азота; образования на поверхности сварочной ванны и металла шва слоя шлака, защищающего ванночку от доступа воздуха и замедляющего охлаждение шва; раскисления металла шва и его легирования.

По видам покрытия подразделяют: А – с кислым покрытием; Б – с основным покрытием; Ц – с целлюлозным покрытием; Р – с рутиловым покрытием; П – с покрытием прочих видов. При покрытии смешанного вида используют соответствующее двойное обозначение.

По толщине покрытия в зависимости от отношения диаметра покрытия  $D$  диаметру проволоки  $d$  электроды подразделяют: М – с тонким покрытием ( $D/d \leq 1,20$ ); С – со средним покрытием ( $1,20 < D/d \leq 1,45$ ); Д – с толстым покрытием ( $1,45 < D/d \leq 1,80$ ); Г – с особо толстым покрытием ( $D/d > 1,80$ ).

По назначению электроды подразделяются: У – для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей; Л – для сварки легированных конструкционных сталей; Т – для сварки легированных теплоустойчивых сталей; В – для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами; Н – для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами.

С помощью ручной дуговой сварки соединяются не только углеродистые и легированные стали, но и возможна сварка чугуна и цветных металлов.

Основным типом сварных соединений являются: стыковые, тавровые, угловые, внахлестку. Форма поперечного сечения кромок и шва стандартизованы. Форма разделки кромок определяется толщиной свариваемого металла и положением шва в пространстве.

Скошенные кромки притупляют, чтобы предотвратить сквозное проплавление корня шва. Для лучшего провара между свариваемыми кромками оставляют зазор. Форма разделки кромок должна обеспечить возможность свободного манипулирования электродом при сварке. Зазоры и размеры кромок должны быть неизменными по всей длине соединения.

*Сварка в защитных газах* – общее название разновидностей дуговой сварки, осуществляемой вдуванием через сопло горелки в зону дуги струи защитного газа. В качестве защитных применяют инертные (Ar, He), активные ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ) газы и их смеси ( $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{O}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  и др.).

Инертные газы применяют для сварки химически активных металлов и сплавов, а также во всех случаях, когда необходимо получать сварные швы, однородные по составу с основным и присадочным материалом.

Активные газы применяют, когда заданные свойства металла можно обеспечить металлургической обработкой (окислением, восстановлением, азотированием и т.д.).

Смеси газов используют, чтобы повысить устойчивость дуги, увеличить глубину проплавления, улучшить формирование шва, уменьшить разбрызгивание, повысить производительность. Существенное значение при выборе состава защитного газа имеют экономические соображения.

По отношению к электроду защитный газ можно подавать центрально или сбоку. Защиту сварочной ванны газом, истекающим из горелки, принято называть струйной. Струйная защита относится к наиболее распространенному способу местной защиты при сварке. Качество струйной защиты зависит от конструкции и

размеров сопла, расхода защитного газа и расстояния от сопла до поверхности свариваемого металла.

Сварка в защитных газах имеет ряд преимуществ, из которых главные: возможность визуального, в том числе и дистанционного наблюдения за процессом сварки; широкий диапазон параметров режима сварки в любых пространственных положениях; возможность механизации и автоматизации процесса, в том числе с применением робототехники; высокоэффективная защита расплавленного металла; возможность сварки металлов разной толщины в пределах от десятых долей до десятков миллиметров.

#### *Механизированная дуговая сварка под флюсом*

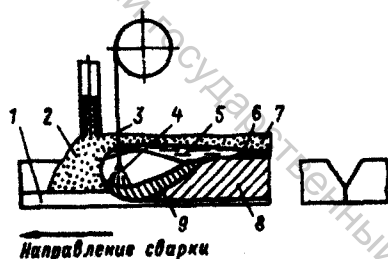


Рис. 5.1. Схема сварки под флюсом

- 1 – изделие; 2 – флюс; 3 – проволока; 4 – дуга; 5 – пленка расплавленного флюса; 6 – шлаковая корка; 7 – нерасплавленная часть флюса; 8 – шов; 9 – расплавленный основной металл

Отличается от других способов сварки плавлением наибольшей производительностью и лучшими гигиеническими условиями труда, высоким уровнем механизации сварочных работ. В этом процессе сварочная дуга (рис. 5.1) горит между изделием 1 и концом сварочной проволоки 3. Под воздействием дуги проволока плавится и по мере расплавления подается в зону сварки. Дуга закрыта слоем флюса 2. Сварочная проволока (а вместе с ней и дуга) пере-

мещается в направлении сварки с помощью специального механизма (автоматическая сварка) или вручную (полуавтоматическая сварка). Под действием теплоты дуги плавятся основной металл и флюс. Расплавленная проволока, флюс и основной металл образуют сварочную ванну. Флюс в виде жидкой пленки 5 покрывает зону сварки, изолируя ее от воздуха. Расплавленный металл сварочной проволоки каплями переносится в сварочную ванну, где смешивается с расплавленным основным металлом 9. По мере удаления дуги металл сварочной ванны начинает охлаждаться, а затем затвердевает, образуя шов 8. Расплавленный флюс (шлак) покрывает поверхность металла и остается жидким еще некоторое время после того, как металл уже затвердел. Затем затвердевает и флюс, образуя на

поверхности шва шлаковую корку 6. Избыточная нерасплавленная часть флюса 7 отсасывается или убирается другим способом и используется повторно.

Флюс влияет на устойчивость дуги, формирование и химический состав металла шва; в значительной мере определяет стойкость швов против образования пор и кристаллизационных трещин; от его состава зависит сила сцепления шлаковой корки с поверхностью шва. При плавлении флюса выделяются газы и пар. Наличие во флюсе оксидов щелочных и щелочноземельных металлов увеличивает электрическую проводимость и длину дугового промежутка, что повышает устойчивость процесса сварки.

На форму шва оказывают существенное влияние стабилизирующие свойства флюса, его насыпная масса и гранулометрический состав. Укорачивая дугу, флюс с плохими стабилизирующими свойствами приводит к формированию узких швов с большой глубиной проплавления и высоким усилением. Флюс с хорошими стабилизирующими свойствами удлиняет дугу, обеспечивает широкие швы с малым проплавлением и небольшой высотой усиления.

Промышленное применение находят одноэлектродная, двухэлектродная и многодуговая сварка.

*Одноэлектродная сварка* ведется проволокой  $\varnothing 1,6 - 6$  мм. При толщине металла до 20 мм возможна односторонняя сварка, но предпочтительна сварка с двух сторон.

*Двухэлектродная сварка* осуществляется по двум вариантам: с поперечным (рис. 5.2, а) и последовательным (рис. 5.2, б) расположением электродов. В сварочную цепь проволоки подключены параллельно, а ток к ним подводится от общего источника питания. Подача проволок осуществляется двоякими роликами.

Первый вариант целесообразен при сварке длинных швов, например в судостроении, когда трудно обеспечить постоянный зазор. Дуги направлены не в зазор, а на кромки. Благодаря этому уменьшается глубина проплавления и предотвращается протекание сварочной ванны. При втором варианте повышается скорость сварки; уменьшается склонность швов к образованию пор, так как облегчается удаление газов из сварочной ванны; повышается стойкость к образованию кристаллизационных трещин вследствие замедленной скорости охлаждения. Возможна сварка и большим числом проволок.

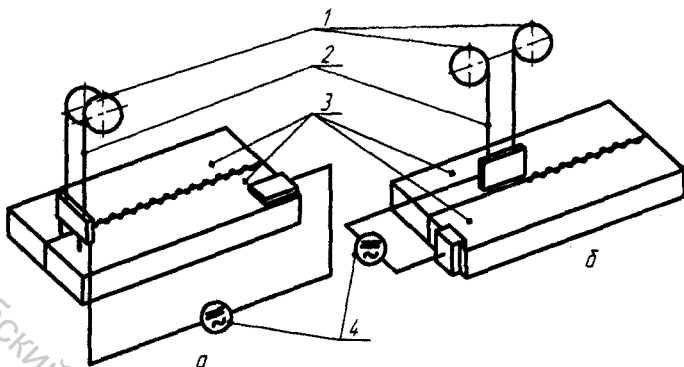


Рис. 5.2. Двухэлектродная сварка под флюсом: а – поперечное расположение электродов; б – последовательное расположение электродов; 1 – намоточные барабаны; 2 – электроды; 3 – свариваемые пластины; 4 – источники тока

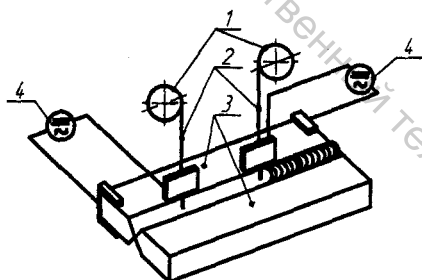


Рис. 5.3. Двухдуговая сварка под флюсом:

1 – намоточные барабаны; 2 – электроды; 3 – пластины; 4 – источники тока

Многодуговая сварка ведется независимыми дугами в общую или отдельные ванны. Каждая дуга питается от отдельного источника. Чаще применяют двух- и трехдуговой процессы. На рис. 5.3 показана схема двухдугового процесса. Первая дуга проплавляет металл на требуемую глубину, а при прохождении второй дуги расширяется плавильное пространство и обеспечивается необходимая форма шва. Обычно расстояние между электродами 20—40 мм (в отдельных случаях больше). Второй и последующие электроды должны перемещаться в еще жидком шлаке, образующемся при прохождении первой дуги. Применяют комбинированное питание дуг постоянным и переменным током, что повышает качество швов. При многодуговой сварке производительность резко возрастает. Многодуговая сварка чаще применяется в трубосварочном производстве.

Основной объем работ выполняется электродными проволоками  $\varnothing 3, 4$  и  $6$  мм. Режимы сварки выбираются в зависимости от толщины свариваемого металла.

ла, вида разделки кромок, количества проходов и способа удержания сварочной ванны.

Режимы сварки определяются следующими параметрами: силой тока сварки (прямо пропорциональна подаче электродной проволоки), напряжением дуги, диаметром сварочной проволоки, вылетом электрода, скоростью сварки, а также углом наклона электрода или изделия.

Технология и техника сварки под флюсом весьма разнообразны и определяются конструкцией сварного соединения, конфигурацией и протяженностью швов, толщиной и химическим составом свариваемого металла, применяемой аппаратурой (одно-, двух-, многодуговая) и др.

Односторонней однопроводной сваркой соединяют металл толщиной до 30 мм. Более толстый металл сваривают двусторонними однопроводными или многопроводными швами. В настоящее время сварку под флюсом используют для соединения металла толщиной до 120 – 150 мм. Двусторонняя сварка применяется при создании всевозможных сварных металлоконструкций и изделий: паровых котлов, химической и нефтяной аппаратуры, строительных металлоконструкций, цистерн, судокорпусных конструкций и т.д.

Двусторонняя автоматическая сварка менее экономична и менее производительна, чем односторонняя, но имеет то преимущество, что более надежна, так как на качество швов по этой технологии в меньшей степени влияет изменение режимов сварки, смещение электрода от оси шва, точность подготовки кромок. Кроме того, не требуется сложных устройств для получения полного провара и формирования корневой части шва.

## **5.2. Электрошлаковая сварка**

*Электрошлаковая сварка* – принципиально новый способ получения неразъемного соединения металлов практически неограниченной толщиной – стала одним из ведущих технологических процессов. В отличие от других способов сварки плавлением при электрошлаковой сварке источником нагрева служит тепло, выделяющееся в ванне расплавленного флюса при прохождении через нее тока от электрода к изделию.

Электрошлаковый процесс реализуется следующим образом (рис. 5.4). Шлаковая ванна 4 образуется в результате расплавления сварочного флюса и находится в расплавленном состоянии в течение всего процесса сварки. Сварочный ток, проходя через шлаковую ванну 4 между погруженными в нее

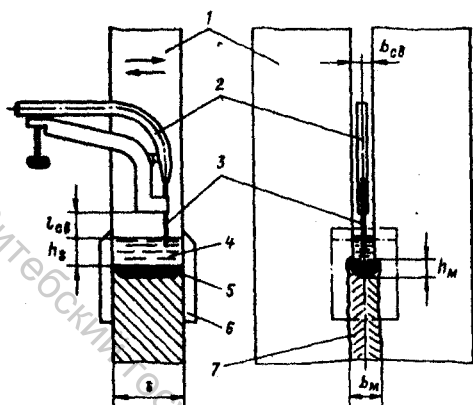


Рис. 5.4. Схема электрошлаковой сварки:

- 1 – свариваемые детали шириной  $b$ ; 2 – мундштук для подачи электрода; 3 – электрод; 4 – шлаковая ванна глубиной  $h_{\text{ш}}$ ; 5 – металлическая ванна глубиной  $h_{\text{м}}$ ; 6 – формирующий ползун; 7 – сварной шов. Детали собраны с зазором величиной  $b_{\text{св}}$ ;  $l_{\text{св}}$  – сухой вылет электрода

дается шлаковой ванне, а от нее электроду и свариваемым кромок. Устойчивый процесс возможен только при постоянной температуре шлаковой ванны. Рабочая температура шлаковой ванны может достигать под электродом  $1900 - 2000^{\circ}\text{C}$ .

Большая часть тепла, выделяющегося в шлаковой ванне, переносится в металлическую ванну, а от нее – к кромок соединяемых деталей через капли нагретого электродного металла.

Общее количество генерируемого в шлаковой ванне тепла расходуется следующим образом: 20 – 25% на плавление электродной проволоки; 55 – 60% на плавление и нагрев основного металла; 4 – 6% на плавление флюса и поддержание шлаковой ванны в жидком состоянии; 12 – 16% – потери тепла через ползуны и теплоотвод в массу металла.

Основные способы электрошлакового сварочного процесса представлены на рис. 5.5 и 5.6.

Наибольшее применение получили способы а, б (рис.5.5). Этими способами можно сваривать металл толщиной от 20 до 450 мм, используя преимущественно 3-мм проволоку. Способом в можно сваривать металл толщиной до

электродами 3 и металлической ванной 5, поддерживает высокую температуру и теплопроводность шлака. Объем и глубину шлаковой ванны сохраняют, как правило, постоянными. Для этого зазор между свариваемыми кромок закрывают с боков водоохлаждаемыми ползунами 6. Металлическая ванна 5, кристаллизуясь, образует сварной шов.

При электрошлаковой сварке почти вся электрическая мощность пере-



120 мм. Способ *г* обеспечивает повышение скорости сварки в 1,5—2,0 раза по сравнению со способами *а*, *б*. Способ *д* можно рекомендовать для электрошлаковой сварки низколегированных сталей толщиной до 100 мм без последующей высокотемпературной термической обработки сварного соединения.

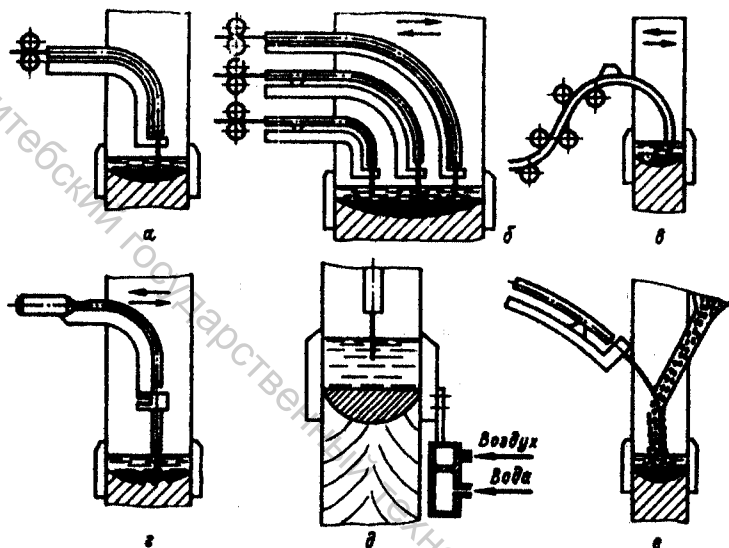


Рис. 5.5. Электрошлаковая сварка проволочными электродами:

*а* — одной проволокой без колебаний; *б* — одной, двумя или тремя проволоками с колебаниями; *в* — одной проволокой диаметром 5 мм без введения мундштука в зазор; *г* — проволокой с увеличенным «сухим» вылетом; *д* — с использованием сопутствующего принудительного охлаждения; *е* — с присадкой порошкообразного материала

Способ *е* используется при монтаже крупногабаритных изделий, сварные соединения которых не подвергаются последующей высокотемпературной термической обработке. Толщина свариваемого металла до 60 мм. Способ характеризуется повышенной скоростью сварки и значительно лучшими механическими свойствами соединения. Все перечисленные способы осуществляются на стандартной сварочной аппаратуре.

Электрошлаковая сварка (рис. 5.6, *а—в*) плавящимся мундштуком предназначена для соединения металла большой толщины (>450 мм), прямыми и криволинейными швами. Разновидность этого способа — сварка трубчатым пла-

влящимся мундштуком, которая позволяет соединять металл толщиной от 20 до 60 мм.

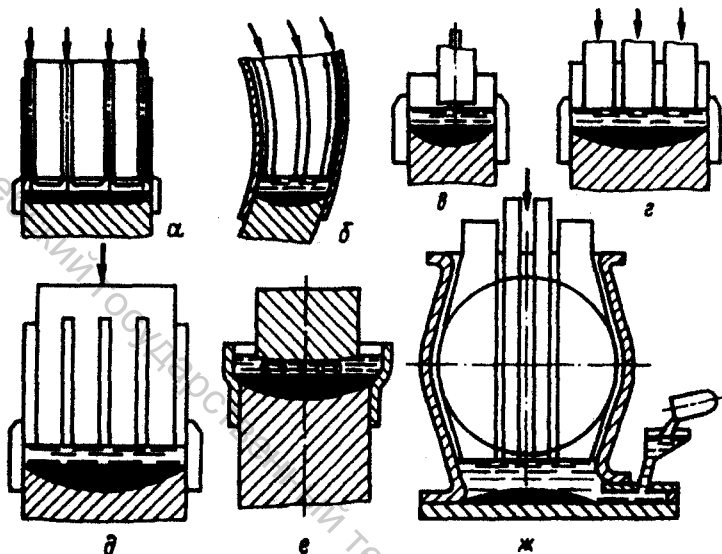


Рис. 5.6. Электрошлаковая сварка плавящимся мундштуком и электродами большого сечения:

а и б — с прямолинейными швами и криволинейными швами; в — трубчатым мундштуком; г и д — одной, двумя или тремя пластинами (а — обычными, д — широкими с продольными разрезами); е — контактно-шлаковая сварка; ж — электрошлаковая сварка с бифилярной схемой подключения пластинчатых электродов

Электрошлаковая сварка электродами большого сечения (рис. 5.6, г—ж) включает в себя: г—сварку одной, двумя или тремя пластинами, подключенными к общему или разным источникам сварочного тока; д—сварку одной, двумя или тремя широкими пластинами, имеющими продольные разрезы; е—контактно-шлаковую сварку; ж—сварку пластинчатыми электродами с бифилярной схемой подключения электродов к источнику питания (применяют для сварки сталей крайне редко). Наиболее распространен этот способ при сварке меди и алюминия. Толщина пластинчатых электродов составляет 20—40 мм.

Электрошлаковой сваркой можно получать стыковые (рис. 5.7), угловые и тавровые (рис. 5.8) и практически все виды швов (рис. 5.9).

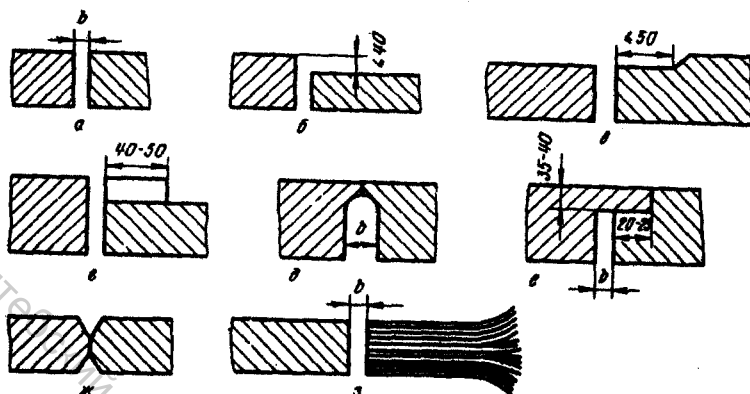


Рис. 5.7. Типы стыковых соединений, полученных электрошлаковой сваркой: а и б – с равными и разными толщинами свариваемых кромок; в – с уменьшением одной кромки до размеров сопрягаемой; г – с увеличением толщины более тонкой кромки; д – с фигурной разделкой кромок; е – «замковое соединение»; ж – Х-образное соединение; з – соединение монолитной кромки с набором пластин

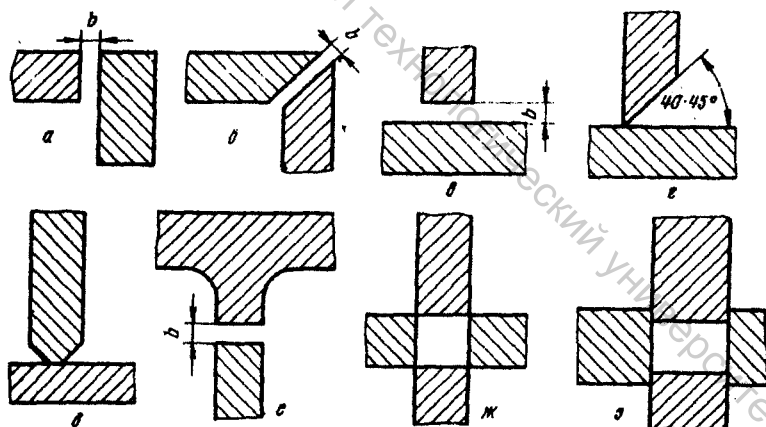


Рис. 5.8. Угловые и тавровые соединения, получаемые электрошлаковой сваркой: а и б – угловое с прямой и угловой разделкой кромок; в, г и д – тавровое без и с разделкой примыкающего элемента; е – соединение литых деталей; ж, з – крестообразные соединения

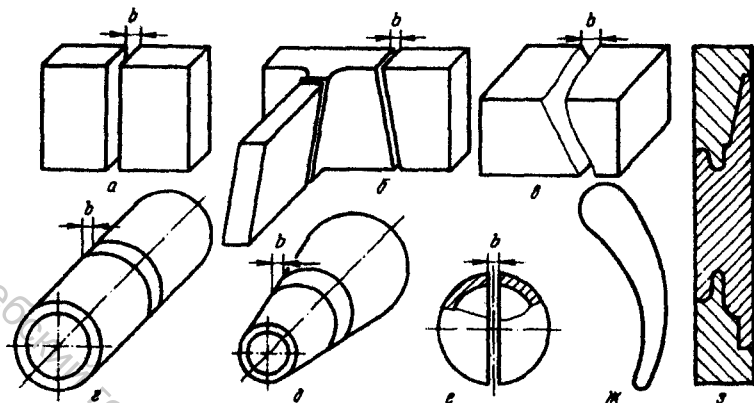


Рис. 5.9. Виды швов, выполняемые электрошлаковой сваркой:

а и б — прямолинейные на вертикальной и наклонной плоскостях; в — пространственной формы; г, д и е — кольцевые на цилиндрической, конической и шаровой поверхностях; ж и з — переменного сечения и с дополнением до прямоугольного

При стыковом соединении между двумя прямыми кромками для возможности осуществления электрошлакового процесса предусматривается, как правило, зазор величиной  $b$  (рис. 5.7 — 5.9), являющийся одним из важнейших технологических параметров режима сварки. Различают зазоры расчетный  $b_p$  — это величина, на основании которой подсчитываются размеры свариваемых деталей, и сборочный  $b_c$ , учитывающий деформацию соединяемых частей конструкции при сварке. Все конструктивные элементы сварных соединений и швов стандартизированы.

Угловые и тавровые соединения (рис. 5.8) встречаются на практике значительно реже стыковых, как правило, при изготовлении станин прессов из проката. При электрошлаковой сварке трубчатым плавящимся мундштуком применяют V- или K-образную разделку примыкающего элемента соединения. Трубчатым мундштуком можно также сваривать крестообразные соединения.

Прямолинейные швы (рис. 5.9) свариваются в вертикальном положении. Возможный наклон не должен превышать  $15\text{—}20^\circ$ . Кольцевые швы могут выполняться не только на цилиндрической, но и на конической и сферической поверхностях.

При сварке заготовок с фасонными кромками типа тавров, швеллеров или цилиндров существующее сечение дополняют до прямоугольного специальными планками. Толщина планок в этом случае находится в пределах 60—200 мм.

#### *Достоинства и недостатки электрошлаковой сварки*

Электрошлаковую сварку отличает высокая производительность, которая возрастает почти в геометрической прогрессии от толщины свариваемого металла. Это обусловлено не только высоким коэффициентом наплавки, который почти в два раза превышает таковой для электродуговой сварки под флюсом, но и тем, что металл практически любой толщины сваривается за один проход.

Расход флюса при электрошлаковой сварке меньше, чем при электродуговой сварке, в 10—20 раз и составляет 5% расхода электродной проволоки.

Расход электроэнергии в полтора—два раза меньше, чем при электродуговой сварке под флюсом, и в четыре раза меньше, чем при ручной электродуговой сварке.

При вертикальном положении шва значительно облегчается всплытие газовых пузырей и частиц шлака и удаление их из металла. Поэтому склонность к образованию пор и других неплотностей при электрошлаковой сварке во много раз ниже, чем при дуговой многопроходной сварке.

Наиболее существенным недостатком электрошлаковой сварки является необходимость последующей высокотемпературной термической обработки сварного соединения для восстановления высоких служебных характеристик сварной конструкции. Известно, что в процессе электрошлаковой сварки металл шва и околошовной зоны подвергается значительному перегреву. Это способствует снижению пластических свойств сварного соединения, особенно при отрицательных температурах. Весь опыт электрошлаковой сварки показывает, что вопросы необходимости применения высокотемпературной термической обработки, повышения качества сварных соединений и производительности процесса следует решать комплексно путем рационального выбора свариваемых и сварочных материалов, приемов и режимов сварки.

Электрошлаковой сваркой соединяют стали разных классов и марок: жаропрочные и никелевые сплавы, титан, алюминий, медь и сплавы на их основе.

Внедрение электрошлаковой сварки открыло возможность получения заготовок и изделий любой формы, практически неограниченных размеров и отливок,

поковок и проката. Разработанные методы точной компенсации деформаций позволяют изготавливать сварные крупногабаритные конструкции с заданными размерами. Применение электрошлаковой сварки наиболее экономично при толщине металла более 40 мм.

### **СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ**

При сварке давлением соединение осуществляется за счет совместной пластической деформации материалов в зоне контактирования. Нагрев выступает в качестве сопутствующего активирующего фактора и может отсутствовать вообще.

#### **5.3. Холодная сварка**

*Холодная сварка* осуществляется при значительной совместной деформации без внешнего нагрева соединяемых деталей. Соединение при холодной сварке образуется за счет возникновения металлических связей между соединяемыми частями. Пластическая деформация обеспечивает образование физического контакта, активацию контактных поверхностей и их схватывание. На заключительной стадии образования сварного соединения необходимо всестороннее сжатие с приложением значительного давления в зоне контакта.

##### *Способы сварки*

*Точечная холодная сварка* – это способ соединения деталей посредством вдавливания пуансона на глубину, достаточную для образования сварной точки. Холодная точечная сварка может выполняться без предварительного (рис. 5.10, а, б) или с предварительным (рис. 5.10, в, г) сжатием деталей путем одностороннего (рис. 5.10, а, в) или двустороннего (рис. 5.10, б, г) деформирования.

К холодной точечной сварке с предварительным сжатием относится сварка в зажимных плитах 6 с кольцевыми выточками 7 (рис. 5.10, д).

Точечной сваркой соединяют листы, ленты, полосы толщиной до 12 – 15 мм. Форма сварных точек разная: круглая, прямоугольная, крестообразная, сферическая. В многоточечном соединении все сварные точки выполняются, как правило, одновременно. Наиболее рациональна холодная точечная сварка алюминия, меди, алюминия с медью.

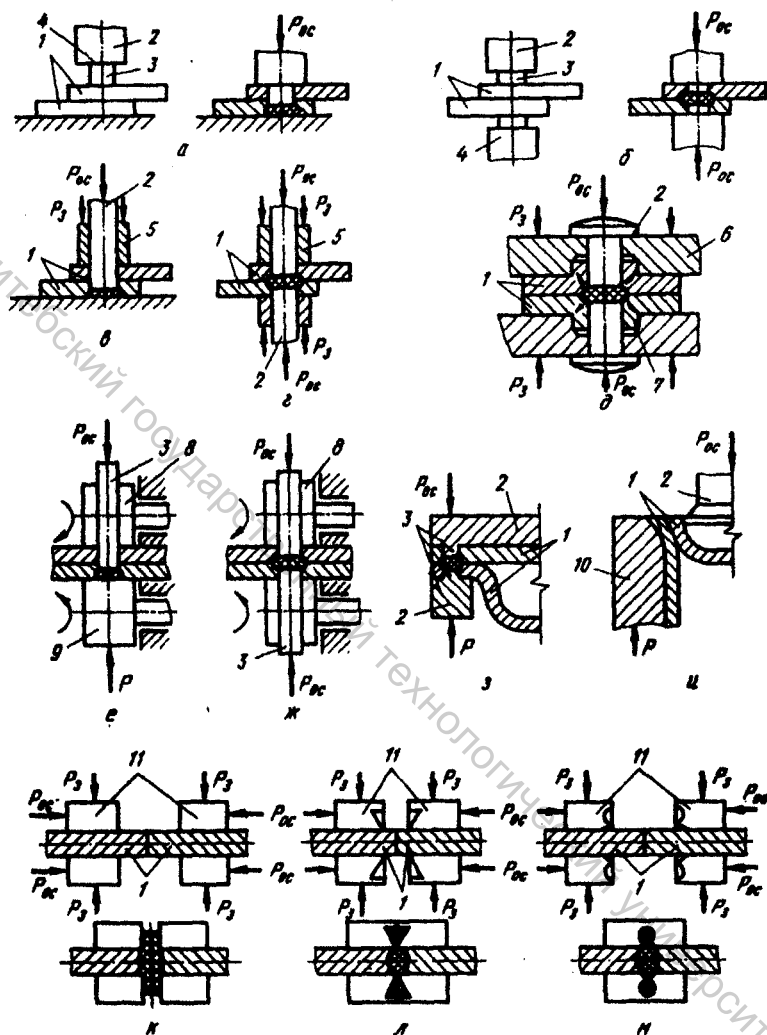


Рис. 5.10. Схемы холодной сварки:

а – б – точечная нахлестку; в – и – шовная; к – м – стыковая

1 – свариваемые детали; 2 – пуансоны; 3 – рабочий выступ; 4 – опорная ограничивающая поверхность; 5 – прижимы; 6 – зажимные плиты; 7 – кольцевые выточки; 8 – рабочий ролик; 9 – опорный ролик; 10 – матрица; 11 – зажимные губки.

$P_{oc}$  – усилие осадки;  $P_3$  – усилие сжатия;  $P$  – усилие деформирования

*Холодная шовная сварка* – способ соединения деталей посредством вдавливания рабочих выступов вращающихся роликов или же пуансонов с кольцевыми рабочими выступами. Применяется одностороннее (рис. 5.10, е) или двустороннее (рис. 5.10, ж) деформирование металла. На рис. 5.10, з представлена схема сварки пуансонами с кольцевыми рабочими выступами. Сварка продавливанием через матрицу (рис. 5.7, и) позволяет изготавливать изделие без отбортовки, а также соединять трубу с расположенными в ней перегородками.

Основное назначение холодной шовной сварки – получение герметичных швов при соединении корпусов изделий с крышками. Толщина деталей от 0,3 до 5 мм, диаметр цилиндрических обечаек – до 200 мм (возможно и более).

*Стыковая сварка* – это способ соединения расположенных соосно и закрепленных с вылетом в специальных зажимах деталей посредством деформации (осадки) их свободных концов под действием приложенного осевого усилия с образованием прочного сварного стыка.

Схемы стыковой сварки показаны на рис. 5.10, к-м. Общепринята схема л, при которой сохраняются исходные формы и сечение соединяемых деталей.

Этим видом сварки соединяют проволоку, стержни, полосы, профили сечением, определяемым возможностями существующего оборудования: до 15 см<sup>2</sup> из алюминия и до 10 см<sup>2</sup> из меди. Встык можно сваривать алюминий, его сплавы с медью, никелем, цинком, медь с серебром и др.

#### *Применение холодной сварки*

Наиболее широко применяется холодная сварка в электротехнике. С ее помощью успешно заменяют дефицитную медь алюминием в качестве токопроводящего материала с обеспечением надежных контактных соединений. Холодная сварка обеспечивает безотходное изготовление обмоток электрических машин и трансформаторов. Холодной сваркой можно создавать новые конструкции электротехнических изделий, масса которых значительно меньше аналогов (охлаждатели полупроводниковых приборов, силовые конденсаторы, распределительные устройства).

Замена холодной сваркой существующих технологических процессов также дает значительную экономию металла. Так, замена штамповки медных коллекторных пластин электрических двигателей на холодную сварку позволяет сократить отходы металла в восемь—десять раз. В радиотехнике и радиоэлектронике холодную сварку применяют для герметизации корпусов полупроводниковых при-



боров; в цветной металлургии—для соединения алюминиевых или титановых катодных штанг с магистральными медными шинами; в приборостроении—для изготовления шасси, приборов из алюминия и его сплавов; в автомобильной промышленности — при изготовлении радиаторных трубок из алюминиевых сплавов; в машиностроении—для герметичного пережатия штенгелей (трубок, отводов), при изготовлении медных уплотнительных колец для гидросистем машин и механизмов, а также переходных элементов из разнородных материалов, используемых в изделиях криогенной техники; на электрифицированном железнодорожном, городском и промышленном транспорте—для соединения медных контактных (троллейных) проводов; в различных отраслях промышленности—при изготовлении посуды, бачков, молочных фляг и других изделий из алюминия.

#### 5.4. Диффузионная сварка

Диффузионная сварка осуществляется путем взаимного проникновения атомов одного металла в другой в процессе нагрева и пластической деформации соединяемых изделий. Процесс может осуществляться с использованием большинства тепловых источников, известных при сварке. Наибольшее применение находят индукционный нагрев, нагрев в расплаве солей, нагрев тлеющим разрядом.

Контакт соединяемых при сварке деталей выполняется либо непосредственно, либо через прослойки (фольговые или порошковые прокладки, покрытия).

Чаще всего диффузионную сварку проводят в вакууме. Однако принципиально возможно осуществление процесса в атмосфере защитных или восстановительных газов или в расплаве солей.

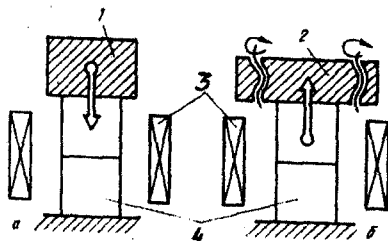


Рис. 5.11. Схемы деформирования при диффузионной сварке:

1 — система нагружения; 2 — система деформирования; 3 — нагреватели; 4 — детали

В практике диффузионной сварки известно применение двух технологических схем, различающихся характером приложения нагрузки. В одной из них используют постоянную нагрузку (рис. 5.11, а). Такую технологию называют диффузионной сваркой по схеме свободного деформирования. На практике такая схема осуществима наиболее просто, поэтому очень широко распространена.

По другой схеме (рис. 5.11, б) нагрузка и пластическая деформация обеспечиваются специальным устройством, перемещающимся в процессе с контролируемой скоростью. Такую технологию называют диффузионной сваркой по схеме принудительного деформирования.

При реализации диффузионной сварки необходимо выполнение следующих условий: поверхности соединяемых материалов должны быть очищены и обеспечен непосредственный их контакт; материалы следует нагреть до температуры, способствующей диффузии через соединяемые поверхности за обусловленный период времени; защитная атмосфера должна предотвращать окисление или загрязнение материалов.

Для осуществления диффузионной сварки заготовки помещают в сварочную камеру и обеспечивают контакт друг с другом. В сварочной камере создают вакуум или другую контролируемую среду. Затем детали нагревают до заданной температуры, прикладывают необходимое сварочное давление и выдерживают при этих условиях в течение определенного времени. После осуществления сварки детали охлаждают в вакуумной камере или на воздухе в зависимости от свойств соединяемых материалов.

Оптимальное значение разрежения выбирают с учетом свойств свариваемых материалов и результатов исследований. При недостаточном вакууме усиливается окисление свариваемых материалов; высокий вакуум существенно снижает производительность сварки и приводит к удорожанию процесса.

В зависимости от свойств свариваемых материалов степень разрежения в вакуумной камере выбирают в диапазоне  $1,3 \cdot 10^{-2} - 1,3 \cdot 10^{-4}$  Па. При сварке малоуглеродистых сталей, меди, никеля требования к остаточному давлению менее жесткие. Присутствие в сплавах хрома, алюминия, титана, вольфрама и других активных элементов приводит к необходимости снижения остаточного давления.

В качестве контролируемых атмосфер применяют осушенные аргон, гелий, очищенные водород, азот или смесь азота с 6 – 8% водорода.

На воздухе сваривают малоуглеродистые и некоторые инструментальные стали. При этом контактные поверхности заготовок после механической обработки защищают от окисления консервирующим покрытием: эпоксидной смолой или глицерином. При нагреве зоны стыка в процессе сварки покрытие выгорает без остатка, а образующиеся газы защищают зону сварки от окисления.

Состав соляных ванн для диффузионной сварки определяется необходимой температурой, например, 850 – 870°C при использовании расплава NaCl, 1000 – 1150°C – при BaCl<sub>2</sub>.

Обработка поверхности должна обеспечить максимальную фактическую площадь контакта свариваемых поверхностей, шероховатость которых должна быть менее Ra 1,25 мкм. Предпочтительно применение механической обработки.

Температура сварки должна обеспечить большую скорость пластического деформирования и развитие диффузионных процессов; ее определяют из соотношения  $T_{св} = (0,5 + 0,7)T_{пл}$ . Для жаропрочных сплавов и тугоплавких металлов она может быть несколько выше.

Сварочное давление должно быть достаточным, чтобы осуществить деформацию микронеровностей и обеспечить максимальную фактическую площадь контакта. Оптимальное значение давления примерно равно пределу текучести свариваемых материалов при температуре сварки.

При сварке материалов, образующих в контакте интерметаллидные фазы, необходимо применение барьерных прослоек. Для этого могут быть использованы гальванические покрытия или фольговые прокладки, изготавливаемые по форме поверхности контактирования. Основное требование при выборе покрытий или прокладок – совместимость с каждым из свариваемых сплавов.

Особое место в технологии диффузионной сварки занимают расплавляющиеся прослойки. Жидкая фаза в зоне соединения образуется за счет применения прослоек, имеющих температуру плавления ниже температуры плавления свариваемых материалов. Наличие жидкой фазы в зоне контакта позволяет ограничить деформирующую нагрузку, снизить температуру сварки, активизировать процесс формирования контакта, что важно при соединении труднодеформируемых жаропрочных сплавов, керамик, сложнелегированных сплавов и других материалов.

#### *Применение диффузионной сварки*

Диффузионной сваркой получают все типы соединений, известные в практике сварки (рис. 5.12). Технологические возможности диффузионной сварки позволяют широко использовать этот процесс в приборостроении, при создании металлокерамических узлов, катодных узлов, полупроводниковых систем.

Диффузионная сварка находит применение для изготовления крупногабаритных заготовок сложной формы, получение которых механической обработкой, методами обработки давлением или литьем невозможно или неэкологично.

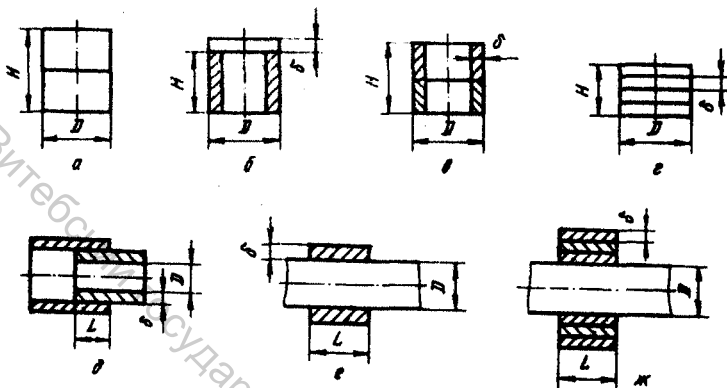


Рис. 5.12. Варианты соединений при диффузионной сварке:

а – массивные детали ( $H/D \leq 6$ ) (соединение по торцевой поверхности); б – листовые элементы и массивная деталь ( $H/\delta < 10$ ); в – трубки, соединяемые по торцу ( $\delta/D > 0,2$ ,  $H/D < 8$ ); г – многослойный пакет ( $\delta/D > 0,2$ ,  $H/D < 6$ ); д – цилиндрические поверхности ( $L/D < 5$ ); е – то же ( $0,5 < L/D < 5$ ,  $\delta \geq 0,05$ ); ж – то же для многослойной заготовки ( $0,5 < L/D < 5$ ,  $\delta \geq 0,05$ )

Путем соединения простых по форме элементов, изготовленных из стандартных полуфабрикатов, можно существенно повысить коэффициент использования металла, а в ряде случаев получить сложные заготовки из разнородных металлов, которые практически невозможно изготовить другими методами сварки. Особенно эффективно такое применение диффузионной сварки в опытно и мелкосерийном производстве. При этом используются открытые прессы в сочетании с герметизированными прессами.

### 5.5. Сварка трением

Сварка трением — способ сварки давлением, при котором механическая энергия, подводимая к одной из свариваемых деталей, преобразуется в тепловую непосредственно в месте будущего соединения. Такое сосредоточенное тепловыделение обуславливает основные особенности сварки трением.

Простейшая и наиболее распространенная схема процесса сварки трением приведена на рис. 5.13. Две детали устанавливаются соосно в зажимах машины. Одна из них неподвижна, другая — приводится во вращение вокруг их общей

оси. На сопряженных торцах деталей, прижатых друг к другу осевым усилием  $P$ , возникают силы (момент) трения. Работа, затрачиваемая на их преодоление, при относительном вращении свариваемых заготовок преобразуется в теплоту, ко-

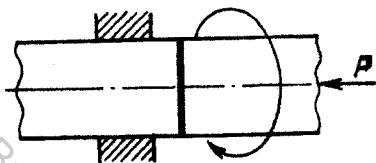


Рис. 5.13. Простейшая (конвекционная) схема процесса сварки трением

торая выделяется на поверхностях трения и в приповерхностных слоях металла, нагревая их до температур, необходимых для образования сварного соединения (при сварке, например, черных металлов температура в стыке достигает  $1000 - 1300^{\circ}\text{C}$ ). Таким обра-

зом, в стыке действует внутренний источник тепловой энергии, вызывающий быстрый локальный нагрев небольших объемов металла.

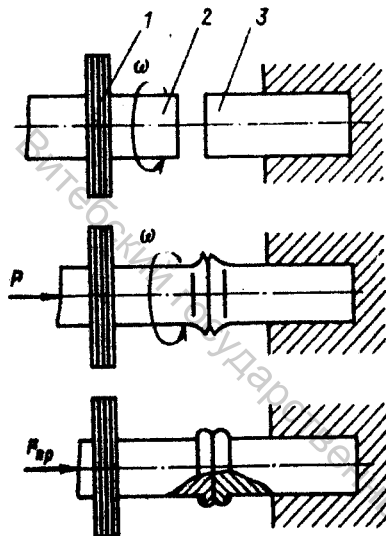
Металл, ставший пластичным в процессе трения, выдавливается из стыка в радиальных направлениях под действием осевого усилия. Происходит осадка — сближение деталей. Выдавленный металл (грat) имеет форму правильного сдвоенного кольца, симметрично располагающегося по обе стороны плоскости стыка. Окисные пленки, покрывающие торцовые поверхности соединяемых деталей до начала сварки, разрушаются и частично удаляются с выдавленным металлом, а также исчезают из стыка вследствие диффузии.

Стадия нагрева завершается прекращением относительного вращения свариваемых деталей. В этот момент в контакт оказываются вовлеченными чистые (ювенильные) поверхности металла, доведенного до состояния повышенной пластичности. Для завершения процесса получения прочного соединения металл подвергается проковке, т. е. дополнительному обжатию осевым усилием, величина которого либо может оставаться такой же, как при нагреве, либо может быть увеличена.

Прочность образующегося соединения определяется свойствами металла соединяемых заготовок, степенью пластического деформирования их концов при нагреве и режимом проковки, а это, в свою очередь, зависит от мощности тепловыделения, количества введенной в изделие энергии, значения усилия проковки и некоторых других факторов. Поэтому частоту относительного вращения свариваемых заготовок, величину осевого усилия при нагреве и при проковке, величину осадки при нагреве и длительность приложения усилия проковки принято считать основными параметрами процесса сварки.

Известны различные модификации сварки трением.

*Инерционная сварка трением* основана на использовании энергии, накопленной маховиком. Шпиндель с насаженным на него маховиком заданной массы



разгоняется (рис. 5.14) и при достижении определенного момента инерции вращающихся масс привод отключают, а заготовки сжимают с заданным усилием. Сварка их завершается в момент остановки шпинделя. Диапазоны регулируемых параметров:  $v=(0,28—11,1)$  м/с;  $P=(47—465)$  МПа.

*Комбинированная сварка трением* может осуществляться по одному из двух вариантов: 1) вначале процесс ведут с постоянной  $\omega$ , а затем привод отключают и завершают сварку по инерционному циклу; 2) начало сварки ведут с постоянной  $\omega$ , затем

Рис. 5.14. Схема инерционной сварки:

1 – маховик; 2, 3 – свариваемые заготовки

по инерционному режиму. По достижении шпинделем частоты вращения, равной  $6+5\text{ с}^{-1}$ , осуществляют его «мгновенное» торможение.

*Колебательная сварка трением* может выполняться за счет угловых колебаний одной или обеих заготовок или в процессе возвратно-поступательного движения (сварка вибротрением). Практическое применение получила только сварка вибротрением для соединения термопластов и реактопластов.

*Орбитальная сварка трением* осуществляется движением прижатых одна к другой заготовок по круговой орбите без вращения вокруг собственных осей (рис. 5.15). Оси заготовок смещены во время стадии нагрева на величину эксцентриситета  $e$ , что позволяет получать относительно собственного временного центра круговые движения с орбитальным радиусом, равным эксцентриситету  $e$ . По завершении стадии нагрева оси совмещают, прекращая тем самым относительное движение заготовок, и выполняют проковку, формируя сварное соединение.

Орбитальная сварка трением позволяет сваривать заготовки, имеющие свариваемое сечение произвольной формы, при равномерном тепловыделении на всей свариваемой поверхности. Это делает ее перспективной для сварки

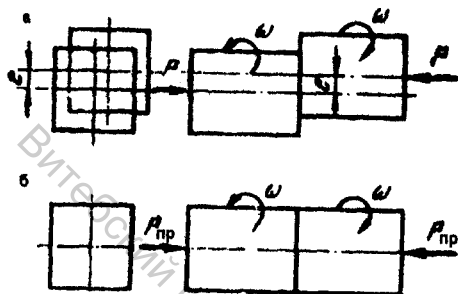


Рис. 5.15. Схема орбитальной сварки трением:

а — стадия нагрева, б — стадия проковки

заготовок с большой площадью поперечного сечения. Сложность машин и низкая надежность зажимных устройств вследствие действия на них значительных инерционных сил препятствуют широкому внедрению этого способа в практику.

Радиальная сварка трением основана на использовании теплоты трения наружного или внутреннего кольца, вращающегося с заданной угловой скоростью, о скошенные концы труб, прижатых одна к другой с определенным усилием (рис 5.16). По окончании стадии нагрева вращение кольца прекращают и его дополнительно сжимают (раздают) в радиальном направлении.

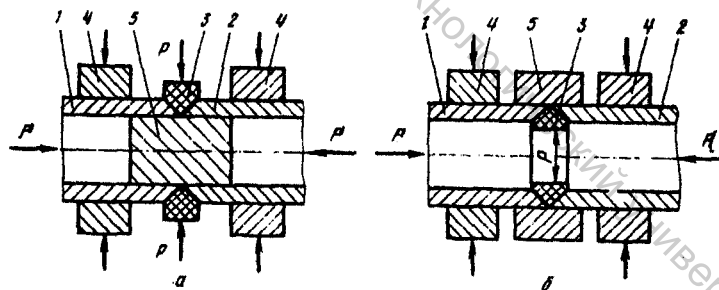


Рис. 5.16. Схема радиальной сварки трением

а — с наружным разжимным кольцом; б — с внутренним разжимным кольцом

1, 2 — свариваемые заготовки; 3 — вращающееся кольцо из присадочного материала; 4 — зажимные элементы; 5 — оправка

#### Особенности сварки трением

Принимая решение об использовании сварки трением в конкретном производственном процессе, необходимо учитывать особенности этого вида сварки, оказывающие большое влияние не только на качество соединений и повторяемость результатов сварки, но и на стоимость производства. Эти особенности пре-

допределяют требования, предъявляемые к конструкции (форме) подлежащих сварке деталей, к их технологической подготовке, а также к механической и термической обработке сваренных соединений.

В случаях сварки особо ответственных конструктивных элементов, а также элементов, работающих в условиях динамических нагрузок (независимо от степени их ответственности), и элементов, к которым предъявляются требования герметичности, рекомендуется выбирать форму заготовок в зоне стыка так, чтобы она по своим очертаниям и размерам была одинаковой у обеих свариваемых заготовок (рис. 5.17, а, б, д, е, ж, з, к, л, н, р, с, т). Это обусловит (при сварке деталей из одинаковых материалов) их симметричный нагрев и симметричную пластическую деформацию в процессе нагрева (трения) и проковки и создаст оптимальные условия для образования прочного соединения. В большинстве случаев выбор оптимальной формы подлежащих сварке деталей потребует их предварительной механической обработки. В случаях сварки менее ответственных деталей, когда заготовки не требуют предварительной механической обработки, можно применять решения, представленные на рис. 5.17, в, г, и, м, о, п.

Основные достоинства сварки трением следующие: высокая производительность процесса, малое потребление энергии и мощности; высокое качество сварного соединения; стабильность качества соединений; простота механизации и автоматизации; гигиеничность процесса; возможность сварки как одноименных, так и разноименных материалов; высокая экономическая эффективность. Недостатком сварки трением является ограничение формы и размеров свариваемых соединений.

### **5.6. Сварка прокаткой**

*Сварка прокаткой* является разновидностью сварки давлением и осуществляется в условиях деформирования при малой длительности взаимодействия. Сварка может выполняться при нагреве соединяемых металлов (горячая сварка прокаткой) и в холодном состоянии при формировании слоистых материалов из пластичных металлов (холодная сварка прокаткой).

Сваркой прокаткой получают металлические конструкции, состоящие из двух или более слоев (компонентов), которые выполняют различные функции. Слой, выполняющий функцию силового элемента, называется основным. Слой, имеющий специальные свойства, которые определяются требованиями конструкции, называется плакирующим. Основной слой, как правило, имеет большую по сравнению с плакирующим толщину и изготавливается из более дешевого материала.



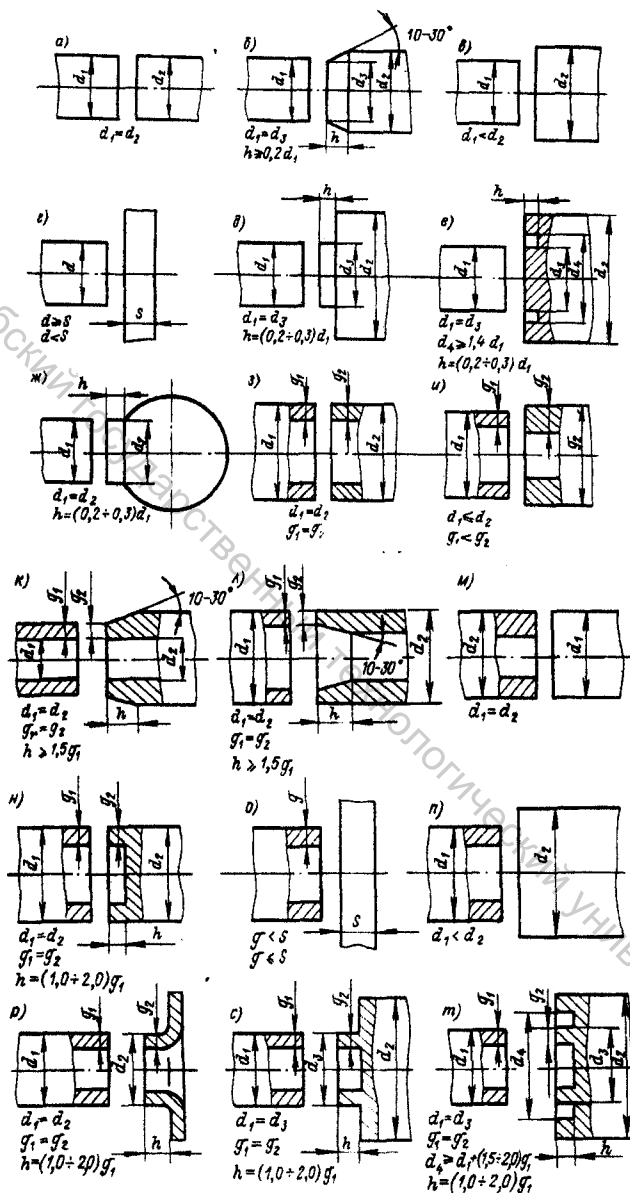


Рис. 5.17. Основные формы заготовок под сварку трением

Исходной заготовкой служит пакет, состоящий из двух слоев металла в виде пластин или слябов. Перед сборкой в пакеты заготовки правят, а их свариваемые поверхности механически обрабатывают, зачищают стальным щетками или подвергают травлению и обезжириванию. Применяют одинарные пакеты – для изготовления одного листа; двойные симметричные пакеты – для изготовления двух листов одинаковой толщины; двойные несимметричные пакеты – для изготовления двух листов разной толщины; тройные пакеты – для изготовления трех листов, два из которых двухслойные, а один трехслойный (рис. 5.18).

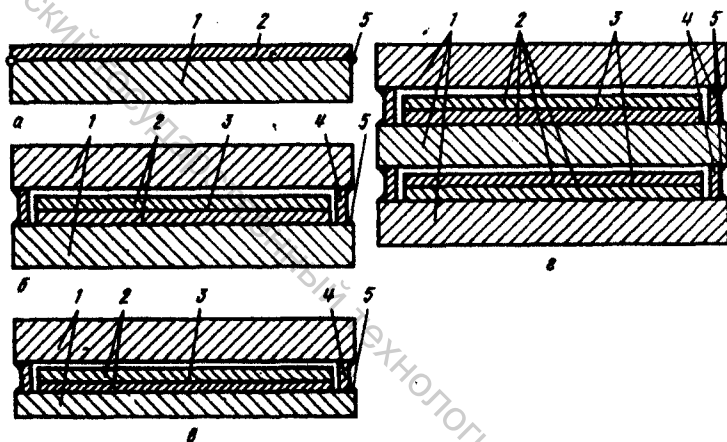


Рис. 5.18. Конструкция одинарного (а), двойного симметричного (б), двойного несимметричного (в) и тройного (г) пакетов:

1 – основной слой; 2 – плакирующий слой; 3 – промежуточный разделительный слой; 4 – планки из углеродистой стали; 5 – сварной шов

Для предотвращения окисления поверхностей заготовок при нагреве перед сваркой пакеты герметизируют по периметру сварным швом.

Для облегчения формирования сварного соединения, а также для уменьшения диффузии углерода из основного слоя в плакирующий, особенно при получении коррозионностойких материалов, в зону соединения вводят промежуточные прослойки.

Основными регулируемыми параметрами сварки прокаткой являются: температура заготовок перед сваркой; диаметр валков; частота вращения валков, величина обжатия.

Сварку прокаткой осуществляют на обычных прокатных станах, используемых для получения однослойных заготовок аналогичных размеров. Для нагрева пакетов перед сваркой используют нагревательные колодцы, методические, камерные газовые печи обычной конструкции.

#### *Применение сварки прокаткой*

Сваркой прокаткой получают коррозионностойкие, износостойкие, электропроводные, инструментальные, жаростойкие, термоупругие, контактные, переходниковые, декоративные слоистые конструкции (рис. 5.19).

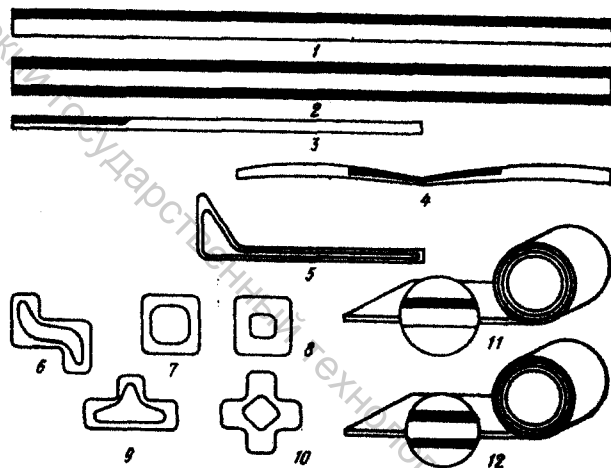


Рис. 5.19. Поперечные сечения профилей сварных конструкций:

- 1 – толстолистовая коррозионностойкая; 2 – толстолистовая трехслойная износостойкая; 3 – листовая для режущего инструмента с местной плакировкой; 4 – двоянная для самозатачивающихся плужных лемехов; 5 – полосульбовая для судостроения; 6–10 – фасонная коррозионностойкая; 11 – двухслойная лента Fe-Ni; 12 – трехслойная лента Al-Fe-Ni

Сварка прокаткой применяется в химической промышленности для изготовления изделий, работающих в различных агрессивных средах; в сельскохозяйственном машиностроении при изготовлении деталей, подвергающихся в процессе эксплуатации сильному изнашиванию, например, плужных лемехов, лап культиваторов, дисков луцильников и других деталей, в которых должны сочетаться поверхностная твердость и вязкость сердцевины. В электротехнической промышленности – для создания сверхпроводящих материалов; в приборостроении – для термоупругих материалов, предназначенных для измерения и регулирования

температуры; защиты электрических цепей от перегрузки. Для получения многослойных композиционных материалов, используемых для повышения жаропрочности, мощности, быстроходности и производительности различных машин и агрегатов.

### 5.7. Сварка взрывом

Сварка взрывом – один из видов сварки давлением, осуществляемый под действием энергии, выделяющейся при взрыве заряда взрывчатого вещества. Принципиальная схема осуществления сварки взрывом представлена на рис. 5.20.

На основании 1 (земляной грунт, дерево, металл и т.п.) расположена одна из свариваемых деталей (в простейшем случае пластина), над которой параллельно с определенным зазором  $h$  на технологических опорах расположена вторая деталь 3. На внешней поверхности детали находится заряд взрывчатого вещества 5 заданной высоты  $H$  и площади, как правило, равной площади пластины 3. В одном из концов заряда находится детонатор 6.

При инициировании заряда по нему распространяется фронт детонационной волны (рис. 5.21).

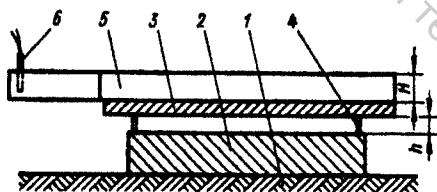


Рис. 5.20. Принципиальная схема сварки взрывом:

1 – основание; 2 – неподвижная пластина; 3 – вторая деталь; 4 – технологические опоры; 5 – заряд взрывчатого вещества; 6 – детонатор

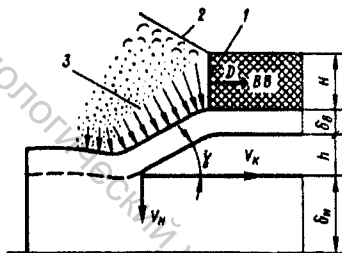


Рис. 5.21. Схема установившегося процесса сварки взрывом:

1 – фронт детонационной волны; 2 – фронт разлета продуктов взрыва BB; 3 – фронт волны разрежения;  $D$  – скорость детонации BB;  $V_N$  – нормальная составляющая скорости соударения контактирующих поверхностей;  $V_K$  – скорость движения вершины динамического угла встречи контактирующих поверхностей  $\gamma$  в направлении сварки ( $V_K = D$ )

Скорость детонационной волны  $D$  для существующих взрывчатых материалов составляет 2000-8000 м/сек. В результате действия высокого давления

расширяющихся продуктов взрыва метаемая пластина приобретает импульс, под действием которого объемы метаемой пластины последовательно вовлекаются в ускоренное движение к поверхности неподвижной пластины. При установившемся процессе метаемая пластина на некоторой длине дважды перегибается, ее наклонный участок со скоростью  $V_K=D$  движется за фронтом детонационной волны, а участок перед ее фронтом с непродетонированной частью заряда занимает исходное положение.

В окрестностях точки соударения развиваются высокие давления, на порядок превосходящие пределы прочности материалов. Деформация метаемой пластины в зоне соударения определяется углом соударения  $\gamma$  и скоростью точки контакта  $V_K$ , которые связаны с исходными параметрами соударения и позволяют изменять режим сварки. В определенном диапазоне изменения этих параметров внутри точки контакта возникает стационарный поток массы соединяемых материалов в виде кумулятивной струи или облака дисперсных частиц. При этом производится самоочистление свариваемых поверхностей, а за точкой контакта создаются условия для их сближения под действием высоких давлений соударения и совместного пластического течения. Длительность процесса составляет  $10^{-6} - 10^{-5}$  сек.

Перед сваркой соединяемые поверхности должны быть зачищены до металлического блеска или протравлены и обезжирены. Исходные материалы не должны иметь внутренних дефектов (включений, пор, трещин), в противном случае возможно разрушение. Прогиб исходных заготовок не должен превышать 5-10 мм на погонный метр. Несоблюдение этих требований приводит к недопустимому колебанию сварочного зазора и, как следствие, к нестабильности свойств биметаллических заготовок по площади, вплоть до отсутствия прочности или появления несправов.

При осуществлении сварки взрывом в условиях промышленного предприятия в качестве локализаторов поражающих факторов взрыва используются подземные выработки, бетонные и металлические взрывные камеры. Наиболее перспективны металлические взрывные камеры. Они представляют собой замкнутые оболочковые конструкции цилиндрической или сферической формы, снабженные грузочным люком, внутренней опорой, системой вентиляции и подрыва заряда. В ряде конструкций взрывных камер применяются внутренние защитные экраны, ослабляющие ударную волну, воздействующую на оболочку.

### *Перспективы и области применения*

Перспективы и области применения сварки взрывом определяются способностью создавать в твердой фазе прочные соединения за счет поверхностных металлических связей без развития объемной диффузии вследствие скоротечности процесса на больших площадях. Имеются примеры сварки соединений площадью 15-20 м<sup>2</sup>. Это позволяет применять сварку взрывом для:

- изготовления композиционных сутунок и слябов с высокопрочным соединением слоев из разнородных металлов, сплавов и сталей для последующей прокатки;
- непосредственного изготовления биметаллических листов металлов и сплавов в любых сочетаниях;
- изготовления сплошных и полых цилиндрических композиционных заготовок для профильного проката и непосредственного использования в деталях машин;
- непосредственной облицовки заготовок деталей машин (например, лопастей гидротурбин) металлами и сплавами;
- изготовления в виде плоских листов и цилиндрических оболочек волокнистых композиционных материалов с неограниченным числом слоев матрицы и волокон;
- изготовления некоторых типов сварных соединений между элементами конструкций из однородных и разнородных материалов;
- нанесения порошковых покрытий на металлические поверхности.

### **КОНТАКТНАЯ СВАРКА**

*Контактная сварка* представляет собой процесс образования неразъемных соединений в результате нагрева металла проходящим электрическим током и пластической деформации зоны соединения под действием сжимающего усилия со стороны электродов. Основными способами контактной сварки являются стыковая, точечная и шовная сварка. Они отличаются по конструкции соединений и технологии их получения.

#### **5.8. Стыковая сварка**

При стыковой сварке детали соединяют по всей площади касания. В зависимости от состояния металла в зоне соединения различают *стыковую сварку сопротивлением и оплавлением*.

Процесс стыковой сварки осуществляется следующим образом. Свариваемые детали 1 укрепляют в токоподводах 2, 3 (рис. 5.22), один из которых, например токоподвод 2, является подвижным и связан с приводом усилия машины. При сварке сопротивлением детали сжимают довольно значительным усилием  $P$  и подают напряжение на первичную обмотку сварочного трансформатора 4, что вызывает появление тока во вторичном контуре. Протекание тока через детали, являющиеся частью этого контура, приводит к постепенному нагреву металла в стыке до температуры, близкой к температуре плавления  $(0,84-0,9) T_{пл}$ . Затем увеличивают усилие (осадка деталей). При этом возрастает перемещение подвижной детали, происходит пластическая деформация металла в стыке и образование соединения в твердом состоянии.

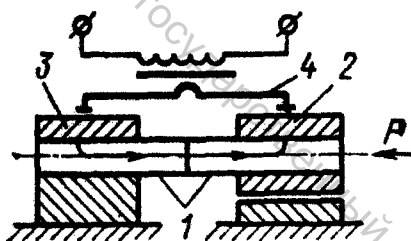


Рис. 5.22. Схема стыковой сварки:

1 — свариваемые детали; 2, 3 — токоподводы; 4 — сварочный трансформатор

При сварке сопротивлением не обеспечивается достаточно полное удаление окисных пленок, и трудно добиться равномерного нагрева деталей по всему сечению. Поэтому сварка сопротивлением используется ограниченно, например, для соединения проволоки, стержней и труб сечением до  $200-250 \text{ мм}^2$  в основном из низкоуглеродистой стали.

При сварке оплавлением детали сближают при очень малом усилии при включенном сварочном трансформаторе. Оплавление деталей происходит в результате непрерывного образования и разрушения контактов — перемычек между их торцами. В результате оплавления на торце образуется преимущественно сплошной слой жидкого металла, который при осадке вместе с загрязнениями (окисными пленками) выдавливается из стыка. Соединение при этом образуется в твердом состоянии. Для более равномерного нагрева деталей применяют предварительный подогрев током, непосредственно подводимым к деталям, или через зазор с помощью индуктора.

#### Применение стыковой сварки

Для защиты металла от взаимодействия с газами при стыковой сварке химически активных металлов используют защитные (инертные газы) среды. Помимо соединения деталей, которые расположены соосно, стыковой сваркой выпол-

няют тавровые соединения стержней с листом, а также сваривают «перекрещивающиеся» проволоки или стержни (решетчатые конструкции). Сварка оплавлением находит применение при создании разнообразных конструкций как малых, так и больших сечений (до 100 000 мм<sup>2</sup>). Таким способом получают длинномерные изделия - трубопроводы, железнодорожные рельсы, заготовки в условиях непрерывной прокатки, арматуру железобетона и т. п. Этот способ применяют для изготовления деталей замкнутой формы: ободьев автомобильных колес; колец жесткости реактивных двигателей (шпангоутов); звеньев цепей, а также сложных деталей из простых заготовок — элементов шасси летательных аппаратов; тяг, валов, кожухов карданных валов автомобилей и др. В целях экономии легированной стали стыковую сварку используют при изготовлении режущего инструмента. Например, к хвостовой части инструмента из низкоуглеродистой или углеродистой стали приваривают рабочую часть из быстрорежущей стали.

### **5.9. Точечная и шовная сварка**

*Точечная сварка* — способ контактной сварки, при котором детали соединяются по отдельным ограниченным участкам касания обычно несколькими точками с определенным шагом. Детали 1 предварительно собираются внахлестку и помещаются между электродами 2 сварочной машины (рис. 5.23, а). Один из электродов опускается, воздействует на деталь со сварочным усилием  $P_{св}$ . После некоторой выдержки, необходимой для обеспечения надежного электрического контакта, на электроды подается напряжение 5—6 В со вторичной обмотки сварочного трансформатора 3 или выпрямителя. Кратковременный (0,01—0,1 с) мощный импульс сварочного тока обеспечивает очень быстрый нагрев и образование зоны расплавления — жидкого ядра 4, общего для обеих деталей. Нагрев сопровождается пластической деформацией металла, и вокруг ядра формируется уплотняющий поясок 5, предохраняющий жидкий металл от выплеска и взаимодействия с окружающей средой. Поэтому специальной защиты зоны сварки, например инертными газами, не требуется. После выключения тока металл ядра быстро охлаждается и кристаллизуется. Между деталями образуется прочная металлическая связь. Усилие с электродов снимают с некоторым запаздыванием, что обеспечивает кристаллизацию под давлением — проковку и отсутствие несплошностей в литом металле (трещин, усадочных раковин, значительных остаточных напряжений и т. п.). В ряде случаев усилие на этой стадии процесса повышают в два-три раза, т. е. применяют ковочное усилие.



Для повышения производительности процесса сварки и стойкости электродов на одной из деталей предварительно формируется выступ 6 (рельеф) (рис. 5.23, б) в сечении полукруглой или трапециевидной формы. Такой способ называется точечной рельефной сваркой. Рельеф ограничивает первоначальную площадь контакта, что дает возможность повысить плотность тока в контакте между деталями, используя при этом электроды с большой площадью рабочей поверхности. При нагреве током рельеф постоянно деформируется, и к концу процесса получают ядро, как и при обычной точечной сварке. Можно осуществлять сварку одновременно по нескольким (двум-трем) рельефам.

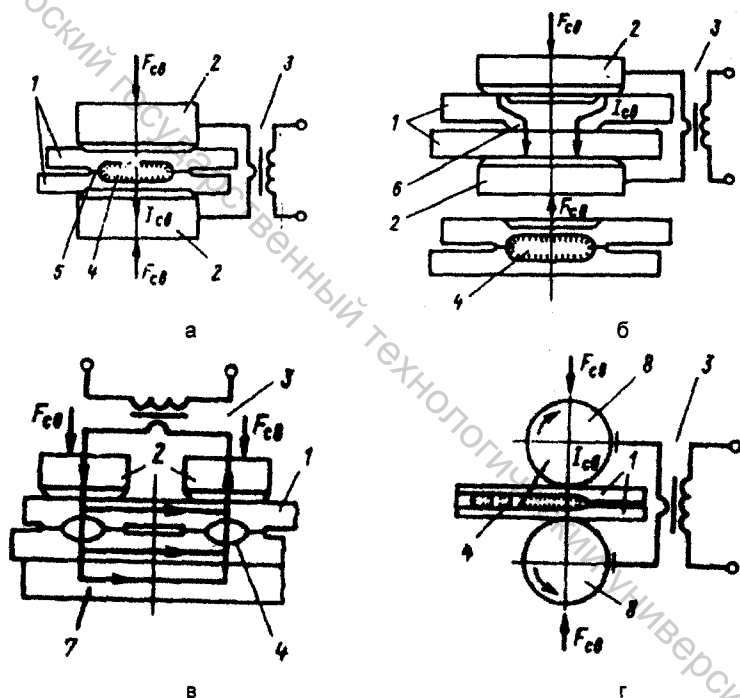


Рис. 5.23. Схемы точечной сварки: а – двусторонняя; б – рельефная; в – односторонняя; г – шовная; 1 – свариваемые детали; 2 – электроды; 3 – трансформатор; 4 – жидкое ядро; 5 – уплотняющий пояс; 6 – выступ; 7 – медная подкладка; 8 – ролики

При затрудненном доступе электродов к одной из деталей целесообразно использовать одностороннюю точечную сварку (рис. 5.23, в). В этом случае собранные детали устанавливаются на медную подкладку 7 (шунтирующий электрод)

и детали сжимаются двумя электродами, расположенными со стороны одной из деталей. При этом можно получить сразу две точки за счет одного импульса тока.

*Шовная сварка* — способ контактной сварки, при котором подвод тока и перемещение деталей осуществляют с помощью вращающихся дисковых электродов—роликов 8 (рис. 5.23, г). Как и при точечной сварке, металл нагревается кратковременными импульсами сварочного тока, следующими через определенную паузу. При этом образуется ряд точек. Если пауза между импульсами достаточно мала, точки взаимно перекрываются и образуется герметичный шов. Шовную сварку подразделяют на непрерывную и шаговую. В первом случае ролики вращаются при сварке непрерывно, а во втором останавливаются на время прохождения тока и проковки соединения, что дает возможность уменьшить износ роликов, остаточные напряжения и склонность к образованию трещин и раковин.

Существуют некоторые разновидности шовной сварки (односторонняя, многошовная сварка, шовная сварка встык и т.д.), отличающиеся схемой подвода тока, числом одновременно выполняемых швов и способом сварки деталей.

Шовная сварка отличается высокой скоростью выполнения соединений до 5 м/мин и более; широко используется в промышленности при создании различных емкостей, резервуаров, топливных баков.

Основные параметры режима сварки: на стадии нагрева - сварочный ток, время его протекания и сварочное усилие; на стадии охлаждения — усилие проковки и время его приложения. Значения параметров могут оставаться постоянными или изменяться на каждой стадии по определенной программе и зависят от свойств свариваемого материала и его толщины.

Технологический процесс производства сварных узлов состоит из целого ряда отдельных операций, выполняемых в определенной последовательности. Для получения соединений высокого качества важны подготовительные операции: подготовка поверхности, сборка и прихватка.

Подготовка поверхности деталей. Назначение этой операции состоит в удалении толстых окисных пленок, после чего на поверхности металла остаются тонкие пленки с малым и стабильным электрическим сопротивлением. Удаляют оксидные пленки механическим или химическим способами.

Сборка. В ходе этой операции достигается взаимное расположение деталей в соответствии с чертежом при определенных (минимальных) зазорах между ними. Сборку обычно ведут по разметке, по эталонному узлу и с применением

шаблонов в специальных приспособлениях. Механизация и автоматизация существенно сокращают время сборочных операций и повышают их качество.

**Прихватка.** Эта операция обеспечивает точную фиксацию деталей в узле и снижение остаточных деформаций. Для уменьшения коробления узла прихватку следует вести в определенной последовательности (рис. 5.24).

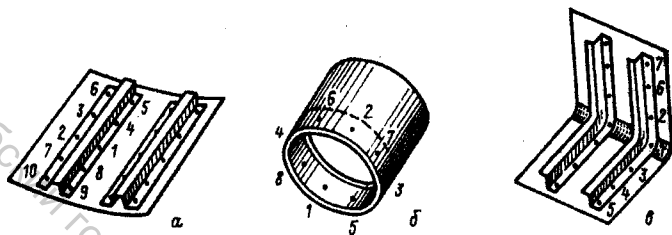


Рис. 5.24. Рациональная последовательность прихватки панелей (а), обечаек (б) и узлов коробчатой формы (в)

### 5.10. Требования к сварным конструкциям

Одно из основных требований – удобство подвода электродов к зоне сварки (узлы «открытого» или «полуоткрытого» типа). Наиболее удобны для сварки открытые панели (рис. 5.25, а), наименее – узлы коробчатой формы, обечайки и трубы малого диаметра и т. п. Детали для точечной и шовной сварки обычно изготовляют из листов и профилей. Если к конструкции не предъявляются требования по герметичности, то применяют точечную сварку; шовная сварка обеспечивает получение прочных плотных швов. При изготовлении герметичных отсеков, баков и т. п. выполнение элементов жесткости меньшей толщины при местном разрушении не нарушит плотности обшивки.

Наиболее важные элементы, определяющие прочность (герметичность) сварных соединений, расчетный (минимальный) диаметр ядра (точечная сварка) и ширина шва (шовная сварка). При достижении требуемых их величин обеспечивается необходимая и стабильная прочность (плотность швов). Фактический диаметр ядра должен быть не меньше указанного в таблице 5.3.

При наладке режима сварщик устанавливает диаметр ядра ( $d_{ном}$ ) на 15—25 % больше минимального, указанного в таблице 5.3, для компенсации колебаний параметров режима, например, уменьшения тока, состояния поверхностей деталей и т. п.

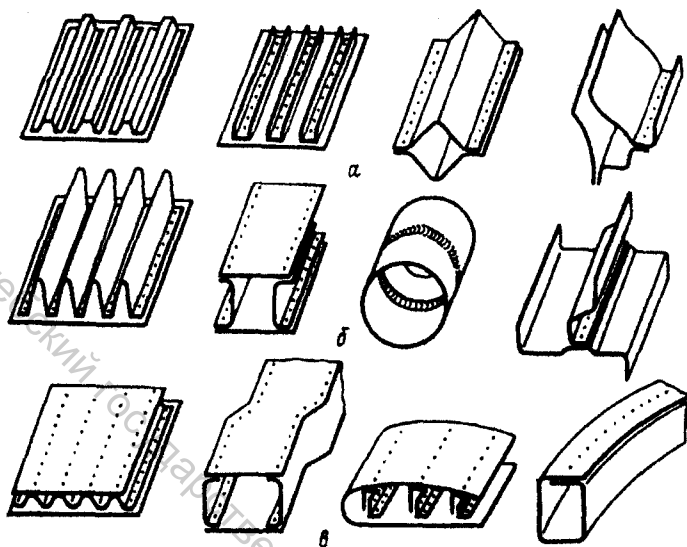


Рис. 5.25. Сварные узлы открытого (а), полуоткрытого (б) и закрытого (в) типов

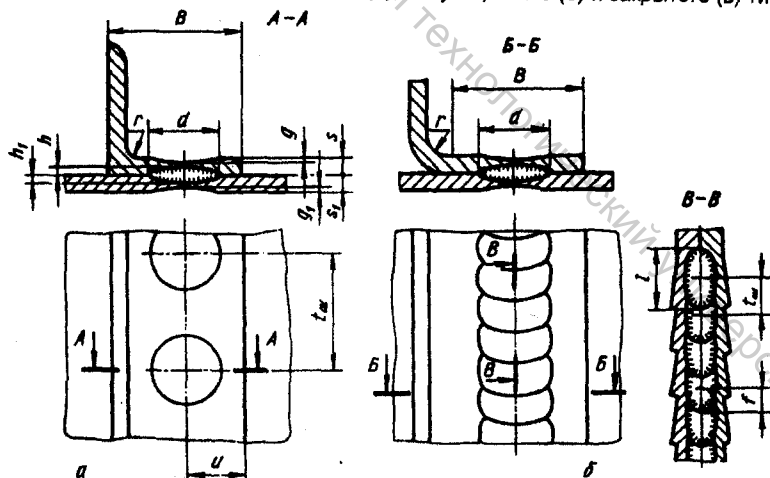


Рис. 5.26. Конструктивные элементы соединений при точечной (а) и шовной (б) сварке

Таблица 5.3

Размеры конструктивных элементов точечных и шовных соединений группы  
при сварке деталей одинаковой толщины однорядным швом

| Параметр*                                                                                                                                              | Толщина детали s, мм |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                                                                                                                        | 0,5                  | 1,0 | 1,2 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 |
| d, мм.....                                                                                                                                             | 3                    | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 12  | 14  | 16  |
| Алюминиевые,<br>магниевые, мед-<br>ные сплавы:                                                                                                         |                      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| B, мм.....                                                                                                                                             | 10                   | 14  | 16  | 18  | 20  | 22  | 26  | 32  | 40  | 50  |
| t <sub>ш</sub> , мм.....                                                                                                                               | 10                   | 15  | 17  | 20  | 25  | 30  | 35  | 45  | 55  | 65  |
| Стали, титано-<br>вые сплавы:                                                                                                                          |                      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| B, мм.....                                                                                                                                             | 8                    | 11  | 13  | 14  | 17  | 19  | 21  | 28  | 34  | 42  |
| Примечание: d – минимальный диаметр литого ядра, ширина литой зоны; B – минимальная величина нахлестки; t <sub>ш</sub> – минимальный шаг между точками |                      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

Для расчетов  $d$  рекомендуется ряд эмпирических формул:  $d=2s+(2\div3)$  мм,  $d=5s^{1/2}$ . Повышение технического уровня современных сварочных машин позволяет в ряде случаев уменьшить  $d$  на 20—30 %.

Величина проплавления (относительная высота ядра)  $h/s$  должна находиться в пределах 20—80 % толщины каждой детали. Для титановых сплавов из-за их низкой теплопроводности проплавление может достигать 95%, а для большинства сплавов оно составляет ~50 %.

Глубина вмятины  $g(g_1)$  (рис. 5.26) должна быть меньше 20 % толщины детали, и лишь при сварке деталей неравных толщин эта величина на тонкой детали может достигать 30 %. Минимальное расстояние (шаг) между центрами соседних точек выбирается из условия ограничения шунтирования тока при сохранении высокой прочности шва. Перекрытие литых зон герметичного шва  $f$  должно быть не меньше 25 % длины литой зоны  $l$ . В среднем же перекрытие устанавливается 50 %. Минимальная величина нахлестки  $B$ —наименьшая ширина сопрягаемой части соединяемых деталей без учета радиуса округления соседних элементов (стенки, полки). При  $t < 2s$  в нахлестку включают не только радиус, но и толщину стенки. Расстояние от центра точки или оси шва до края нахлестки не должно быть меньше 0,55 во избежание раздавливания края. Расстояние между осями соседних рядов (C) на 20 % больше  $t_{ш}$ .

Абсолютные размеры конструктивных элементов увеличивают при росте толщины деталей. При сварке деталей неравных толщин размеры выбирают в соответствии с толщиной более тонкой детали.

Наиболее часто применяют одиночный рельеф (рис. 5.27, а). Для увеличения площади соединений при ограниченных размерах нахлестки используют рельефы продолговатой формы (б), для получения герметичных соединений—кольцевые рельефы (в).

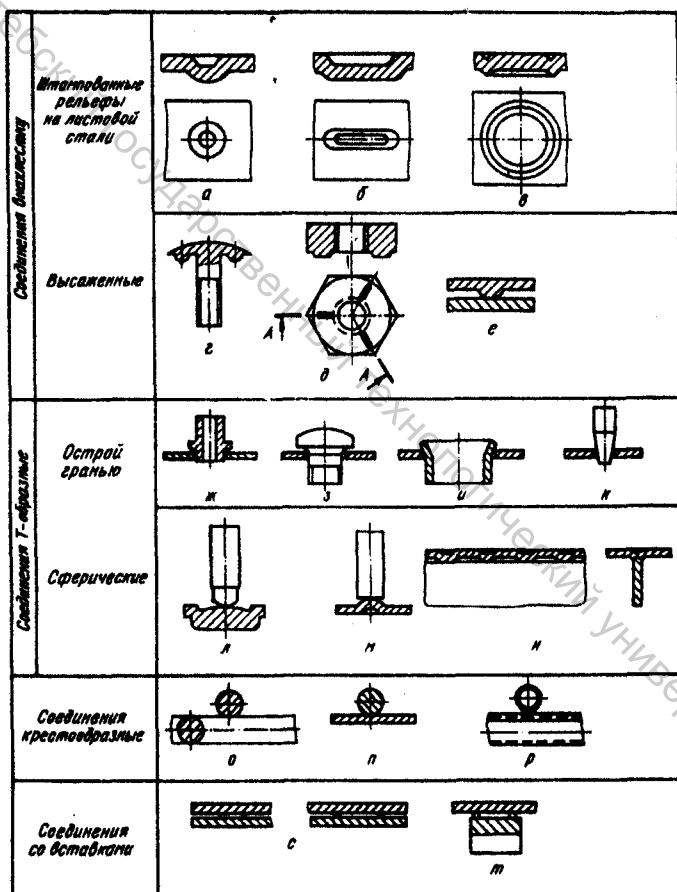


Рис. 5.27. Основные виды применяемых рельефов

Сплавы с малой жаропрочностью рекомендуют сваривать по сплошным рельефам, например по сплошному выступу в виде полусферы (з). При сварке крепежных изделий рельефы высаживают в холодную (з, д). Для получения Т-образных соединений часто применяют рельефы с острой гранью (ж, к). Широко используются соединения, когда одна из деталей (стержень) сваривается с развитой поверхностью другой детали—листом (л, м). Рельеф выполняется на конце стержня или листа. Таким же образом можно соединить трубы с листом или два листа, в которых рельефы расположены на торце листа или в плоскости детали (м). Рельефной сваркой могут быть получены и соединения вкрест проволоки, стержней и труб (соответственно о, п, р), имеющих естественные рельефы. Такие рельефы могут быть выполнены в виде вставок-концентраторов (с, т), если формирование рельефов посадкой или штамповкой затруднено. За счет вставок можно легировать металл ядра. Когда необходимо соединить детали разной толщины или из разных сплавов, рельефы располагают на более толстой детали или из более прочного сплава.

### **5.11. Технологичность сварных соединений**

Технологичность сварной конструкции обеспечивается, прежде всего, выбором рациональной схемы конструкции. Под этим подразумевают не только определение взаимного расположения узлов, но и конструктивное оформление всех ее элементов, распределение металла в элементах, расчленение конструкции на агрегаты, блоки, секции, узлы.

Весьма эффективно применение метода блочно-модульного построения сварных соединений, предназначенных для изготовления сложных конструкций. В результате удается осуществить комплексное проектирование конструкции изделия с учетом рациональной технологии и организации производства. Например, разработка схемы блочного и крупноблочного строительства сварных корпусов кораблей исключает подетальную стапельную сборку и сварку и позволяет перенести большой объем сборочно-сварочных работ со ступеней в цеха. Применение этого метода перспективно также при создании конструкции из алюминиевых сплавов, отличающихся высокой склонностью к деформированию в процессе сварки.

Важным резервом повышения технологичности является создание типовых и стандартизованных сварных деталей и узлов. Это позволяет осуществить массо-

вое механизированное и автоматизированное производство стандартных сварных конструкций и не только снизить их стоимость, но и сократить затраты на проектные работы.

При проектировании сварной конструкции необходимо учитывать следующие факторы:

- число сварных соединений должно быть по возможности минимальным, так как прочность сварных соединений, как правило, ниже прочности основного металла детали;

- для обеспечения равнопрочности сварных соединений и основного металла и для устранения сварочных напряжений часто требуется последующая термическая обработка. Поэтому габариты сварных узлов должны соответствовать возможности их обработки в термических печах. В тех случаях, когда последующая термическая обработка не дает должного эффекта, невозможна или экономически невыгодна, равнопрочность сварных соединений может быть достигнута за счет утолщения кромок элементов конструкции на ширине, не менее зоны термического влияния.

- для предотвращения образования чрезмерных сварочных деформаций в конструкции следует стремиться к симметричному расположению сварных соединений. Режим сварки должен обеспечивать симметричность сечения шва в зоне термического влияния. При сварке тонколистовых конструкций нужно обеспечить жесткое закрепление свариваемых элементов вблизи стыка. В некоторых случаях (например, при изготовлении сварных балок) целесообразно применять предварительный изгиб деталей перед сваркой с таким расчетом, чтобы после сварки изделие приняло заданную форму.

Сварочные деформации тем больше, чем больше сечение шва. Поэтому при проектировании сварной конструкции необходимо предусматривать минимально возможные сечения швов.

Располагать сварные швы вблизи параллельных угловых швов элементов жесткости не следует, так как наличие сварочных напряжений и высокой жесткости соединения может привести к образованию трещин в сварном соединении.

В сварной конструкции не должно быть резких (ступенчатых) переходов по толщине металла, отклонения от симметричности расположения элементов по толщине; не должно быть резких переходов форм конструкции.



## 6. ПАЙКА ЗАГОТОВОК

### 6.1. Общие сведения о методах пайки

Пайка является процессом соединения деталей в твердом состоянии сравнительно легкоплавким припоем, который в жидком виде смачивает паяемые поверхности, заполняет капиллярный зазор между ними и при кристаллизации образует паяный шов.

Пайка, в отличие от сварки плавлением, осуществляется при температурах, лежащих ниже температуры плавления основного материала. Пайка позволяет соединять между собой не только однородные, но и разнородные материалы, а также стекла, керамику и графит.

Соединения, полученные при высокотемпературной пайке специальными припоями, обладают жаропрочностью и химической стойкостью. Поэтому пайку можно применять для изготовления ответственных конструкций во всех областях техники.

При пайке большую роль играют поверхностные явления в процессах смачивания расплавленным припоем и паяемым материалом. Растворение основного материала припоем происходит столь быстро, что даже одноминутная выдержка в процессе высокотемпературной пайки приводит к насыщению центра шва основным материалом почти до растворенного состояния, в результате чего в паяном шве будет уже не припой, а промежуточный сплав из материала паяемых деталей и припоя, существенно отличающийся по свойствам от применяемого припоя.

#### Методы пайки

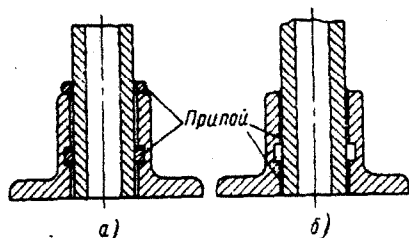


Рис. 6.1. Схема образования шва при капиллярной пайке:

а – перед пайкой; б – после пайки

**Капиллярная пайка.** При этом методе припой затекает в зазор между соединяемыми поверхностями и удерживается в нем за счет капиллярных сил (рис. 6.1). Эта разновидность пайки наиболее распространена. Капиллярные явления присущи в той или иной степени всем методам пайки.

При конструировании и пайке изделий с соединениями большой протяженности необходимо создавать условия для горизонтального течения припоя, так как в вертикально расположенных зазорах высота подъема припоя ограничена действием силы тяжести.

**Диффузионная пайка.** Метод отличается длительной выдержкой и кристаллизацией паяного шва при температуре пайки. В случае реактивной диффузии температура плавления металла шва в процессе пайки резко возрастает.

**Контактно-реактивная пайка.** При этом методе пайки (рис. 6.2) между соединяемыми деталями или между ними и припоем протекают реакции с образованием в контакте между ними нового более легкоплавкого сплава эвтектического состава или твердого раствора. Например, при пайке меди через серебряную прокладку образуется эвтектика медь-серебро, а при пайке никеля через палладиевое покрытие в зазоре образуется сплав палладий-никель типа твердого раствора.

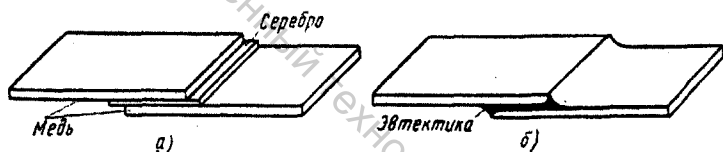


Рис. 6.2. Схема контактно-реактивной пайки:

а – перед пайкой; б – после пайки

**Реактивно-флюсовая пайка.** При такой пайке припой образуется из расплавленного флюса за счет реакции вытеснения между основным металлом и флюсом.

**Пайка-сварка.** В этом случае паяное соединение образуется способами, характерными для сварки плавлением, но с применением припоя в качестве присадочного материала.

**Лужение** – способ покрытия поверхности металлов точким слоем расплавленного припоя с образованием в контакте сплавов того же состава, что и при пайке. Лужение применяют для создания более надежного контакта между основным металлом и припоем или как покрытие для защиты металла от коррозии, а также для увеличения износостойчивости поверхности металлов.

## 6.2. Способы пайки

### Пайка в печах

Для работы используются конвейерные, колпаковые, элеваторные, шахтные печи. Мощность печи 10 – 5000 кВт, температура печи – 1150°C при пайке медью или на 50 °С выше температуры плавления используемого припоя. Перед пайкой необходима тщательная подготовка поверхности деталей. Защитная атмосфера должна быть чистой и сухой. Пайку низколегированных сталей выполняют в среде природного газа. Нержавеющие и высоколегированные стали паяют в атмосфере сухого водорода или диссоциированного аммиака. Требуемое положение паяемых элементов обеспечивают с помощью самофиксирования, развальцовки, клепки, насечки, плотной посадки или специальных приспособлений.

Применяется пайка в печах при массовом производстве однотипных деталей: автомобилестроение, полупроводниковая и электронная промышленность, производство твердосплавного инструмента, теплообменников, холодильников и др. изделий.

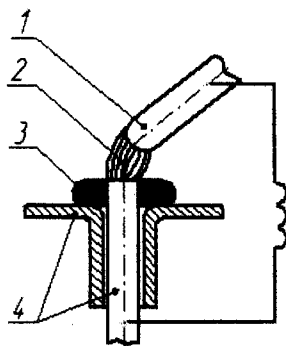
### Индукционная пайка

В зависимости от конструкции паяемых изделий нагрев осуществляют или непосредственно от индуктора (прямой нагрев), или за счет теплоотдачи от графитового или стального вкладыша, нагреваемого токами высокой частоты (косвенный нагрев). Применение токов высокой частоты позволяет быстро нагреть деталь до температуры плавления припоя при минимальном окислении и короблении изделия и дает возможность непосредственно вести наблюдение за ходом всего процесса пайки.

По сравнению с другими способами пайка с индукционным нагревом имеет следующие преимущества: большую производительность процесса; возможность автоматизации; кратковременный нагрев, благодаря чему меньше окисляется металл и ограничивается протекание диффузионного процесса; легко устанавливается и поддерживается постоянная температура нагрева; хорошие условия труда; возможность производить пайку в вакууме и пайку в защитных средах, применяя для этих целей специальные контейнеры. К недостаткам этого процесса следует отнести большие первоначальные затраты и трудность пайки деталей сложной конфигурации.

Индукционной пайкой можно соединять все токопроводящие материалы (сталь, медь, алюминий, твердые сплавы) и керамику, если она покрыта электропроводящим слоем. Пайку нагревом токами высокой частоты широко применяют при напайке пластинок из твердого сплава, в радиотехнике электронике и во многих других областях промышленности. При средних частотах (1 – 10 КГц) возможна пайка стали толщиной 5 – 15 мм и меди толщиной 4 – 12 мм; при высоких частотах (0,1 – 5 МГц) выполняется пайка стали толщиной 0,1 – 3 мм и меди толщиной 0,3 – 3 мм.

Большое значение при пайке имеет расстояние между индуктором и изделием. Его выбирают в пределах 2 – 20 мм в зависимости от размера и конфигурации детали и толщины стенок. Во избежание перегрева изделия расстояние между индуктором и деталью около углов обеспечивают больше, чем с основной поверхностью, а в местах с большим теплоотводом, наоборот, сокращают. Примеры правильного конструирования и расположения индукторов приведены в таблице 6.1. Индукционная пайка применяется в массовом производстве деталей простой конфигурации: машиностроении, автомобилестроении, металлообрабатывающей и электротехнической промышленности, изготовлении медицинского оборудования и др.



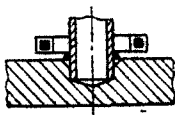
#### Электродуговая пайка

Этот способ применяют при пайке проводов, ленточных пил, деталей приборов, электродвигателей.

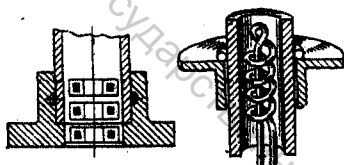
Электрическая дуга горит между двумя электродами или электродом и паяемым изделием (рис. 6.3). Высокая температура дуги позволяет вести пайку очень быстро и тем самым минимизировать окисление припоя.

Рис. 6.3. Пайка с нагревом электрической дугой: 1 – электрод; 2 – дуга; 3 – припой; 4 – паяемые изделия

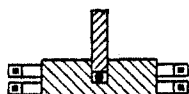
## Технологические схемы расположения индуктора



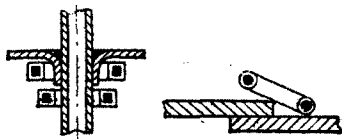
Для достижения равномерного нагрева в зоне пайки необходимо, чтобы расстояние между индуктором и трубой было больше, чем между индуктором и плитой



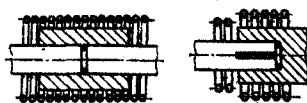
Если нагрев детали осуществлять внешним индуктором, то наружная часть расширится и в контакте возникнет большой зазор, что ухудшит теплоотдачу. Этого можно избежать, если нагревать изнутри



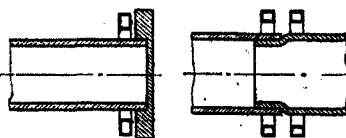
При пайке небольшой детали с массивной необходимо нагревать последнюю



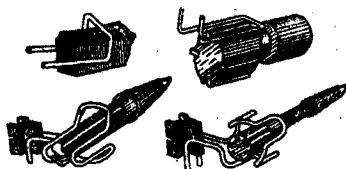
Индуктор располагают так, чтобы паяемые части находились в области действия индуктора



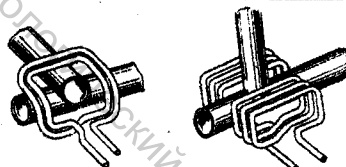
Нагрев под пайку. Соединение вала со втулкой



Расположение индуктора при пайке труб



Расположение индуктора при пайке инструмента



Соединение пересекающихся и скрещивающихся труб



Соединение крышки с коробкой



Соединение штампованных деталей из разнородных металлов

Процесс пайки состоит в обычной очистке изделия от окислов и жира, покрытии мест спая флюсом и вводе припоя. Количество тепла, необходимое для пайки, регулируют, изменяя расстояние между электродами или расстояние от дуги до места нагрева.

*Пайка в керамических блоках и в электронагревательных плитах*

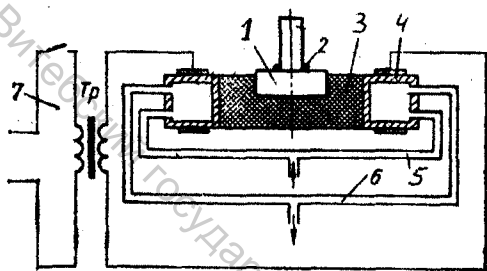


Рис. 6.4. Пайка в графитовом блоке:

1 – деталь в сборе; 2 – припой; 3 – блок графитовый; 4 – губки сварочной машины; 5, 6 – подводная и отводная охлаждающие трубки; 7 – понижающий трансформатор

Пайку ведут в следующем порядке: предварительно собранную деталь 1 с уложенным около шва припоем 2 устанавливают в специальное гнездо графитового блока 3, зажатого в губках 4 сварочной машины. Губки охлаждаются водой, которая по трубке 5 подается, а по трубке 6 отводится из внутренней полости губок. Блок питается от понижающего трансформатора 7. При включении тока блок нагревается; одновременно с этим разогревается паяемая деталь, припой расплавляется и заполняет шов.

Для пайки конструкций сложной формы применяют специальные нагревательные плиты, обогреваемые встроенными в них элементами сопротивления. Электронагревательные плиты можно применять при пайке в вакууме и в контролируемой атмосфере. Для пайки деталь вместе с припоем помещают в контейнер из нержавеющей стали, который заваривают. Для создания вакуума в контейнере имеются трубки, присоединенные к вакуумному насосу. Эти трубки можно использовать для подачи и отвода защитного газа, если требуется пайка в контролируемой атмосфере.

При пайке мелких однотипных изделий их нагревают в графитовом блоке (рис. 6.4), зажатом в губках сварочной машины, или в керамическом блоке, нагреваемом нихромовой спиралью.

Графитовый блок, конструкция которого зависит от формы соединяемых деталей, нагревается электрическим током большой силы.

Заваренный контейнер затем обвертывают асбестовой тканью и помещают для нагрева между огнеупорными плитами.

#### *Пайка погружением в расплавленный припой*

Погружение изделий в расплавленный припой находит применение при пайке изделий с большим числом или большой протяженностью паяных швов. В случае пайки массивных изделий их необходимо предварительно подогревать.

Подготовка к пайке заключается в следующем: изделия очищают от окислов и грязи, обезжиривают, травят, скрепляют между собой и смачивают флюсом так, чтобы последний проник внутрь паяемых швов; после этого изделия погружают в ванну с расплавленным припоем.

Процесс пайки погружением в расплавленные оловянно-свинцовые припои очень часто совмещают с процессом лужения всего изделия. Если же хотят погружением в припой запаять только один шов, то всю остальную часть изделия для предотвращения облуживания покрывают защитным слоем. Хорошей защитой от облуживания оловянно-свинцовым припоем служит покрытие раствором жидкого стекла или смесью его с каким-либо наполнителем (мел, сурик и т. д.). При покрытии защитными растворами следует тщательно оберегать место пайки от попадания на него брызг жидкого стекла, так как это вызовет резкое ухудшение качества пайки; особую осторожность следует соблюдать при пайке герметичных швов.

Для предохранения ванны от окисления поверхность ее посыпают перед погружением детали в ванну хлористым аммонием; окислы снимают деревянной лопаткой,

Метод погружения в расплавленный припой получил большое распространение в автомобилестроении при изготовлении радиаторов; приборов, электронного оборудования и пайке печатных схем (рис. 6.5, а). Разновидностью пайки методом погружения в расплавленный припой является капиллярная пайка. Этот способ основан на способности расплавленного припоя втягиваться под действием капиллярных сил в узкие зазоры (рис. 6.5, б).

Недостатком процесса пайки погружением в расплавленный припой является постепенное загрязнение припоя медью, цинком, железом и другими металлами, что приводит не только к повышению температуры плавления припоя, но и к заметному ухудшению качества паяемых деталей, особенно со швами, от которых требуется герметичность.

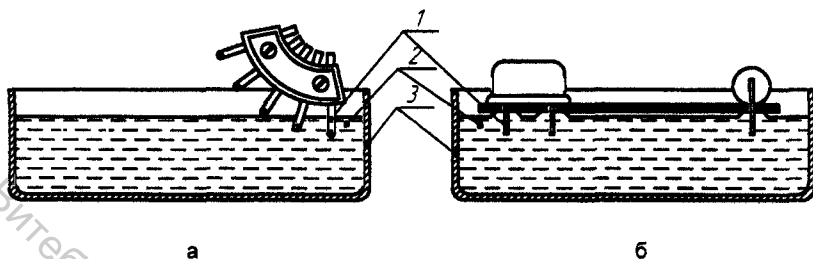


Рис. 6.5. Пайка погружением в расплавленный припой (а); капиллярная (б): 1 – изделие; 2 – расплавленный припой; 3 – ванна  
Пайка волной припоя

Этот способ разработан для одновременной пайки нескольких участков движущейся волны расплавленного легкоплавкого припоя. Волну припоя в зависимости от конструкции установки получают несколькими способами. Наиболее распространенными являются следующие: расплавленный припой подают насосом в трубки 1, из которых он равномерно вытекает на определенную высоту (рис. 6.6, а); в ванну с припоем устанавливают насос, который качает жидкий припой в узкое сопло 2, в результате над зеркалом ванны возникает волна или гребень (рис. 6.6, б); расплавленный припой подают из ванны к каждой точке, подлежащей пайке, через отверстия в фильтре с помощью поршня 3 (рис. 6.6, в).

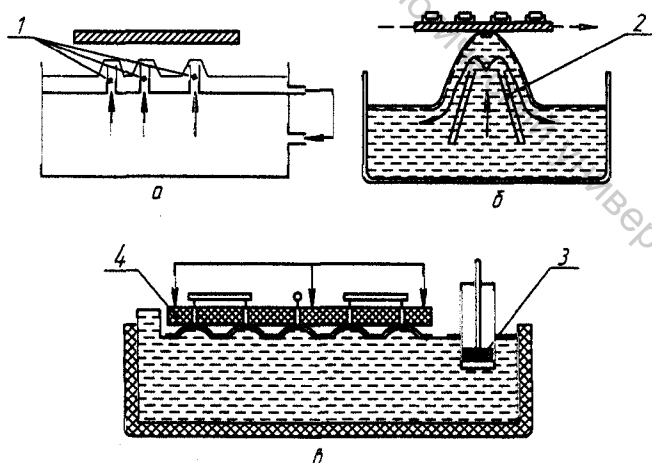


Рис. 6.6. Способы подачи припоя: а – через трубки; б – через сопло; в – через отверстия в фильтре; 1 – трубки; 2 – сопло; 3 – поршень



Паяльная установка состоит обычно из ванны с припоем, устройства для создания волны из расплавленного припоя, приспособления для подачи флюса, пульта управления и механизма подачи деталей. Независимо от конструкции, волна припоя должна иметь спокойную, без завихрений, свободную от окислов поверхность. Подача деталей в волну припоя может осуществляться по горизонтали или под некоторым углом.

### 6.3. Конструктивно-технологические особенности паяных соединений

#### Скрепление изделий перед пайкой

Части сборных изделий перед пайкой должны быть прочно скреплены друг с другом, чтобы предотвратить перекосы и относительное смещение. Способ скрепления подбирают экспериментально в зависимости от конструкции изделия. Для скрепления применяют различные вспомогательные жесткие приспособления, поддерживающие устройства; используют точечную сварку, развальцовку, обжимку, клепку, насечку, свинчивание, плотную посадку и т. п.

При выборе способа скрепления деталей перед пайкой следует исходить из требований, которые будут предъявлены к паяному шву. Если, например, требуется точное соединение двух деталей, то скрепление их собственным весом недостаточно, так как при пайке в этом случае возможно смещение одной детали относительно другой. Если паяный шов должен быть абсолютно герметичным, то нельзя скреплять детали точечной сваркой, так как при сварке образуется окалина, удалить которую из шва не удастся. Примеры проволоочных соединений изделий перед пайкой показаны на рис. 6.7.

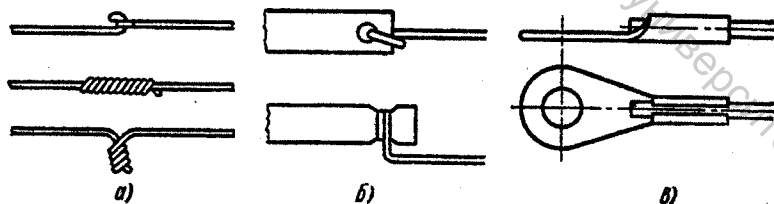


Рис. 6.7. Скрепление проволоочных соединений перед пайкой:

а – двух проводов; б – проволоки со стержнем; в – клеммы с проволокой

### *Размещение припоя перед пайкой.*

В зависимости от назначения припой готовят в виде проволоки, прутков, штампованных колец, пасты и др. Форма припоя определяется формой паяемых изделий; доступностью места, куда укладывают припой; количеством припоя; внешним видом после пайки и трудоемкостью размещения припоя на детали. При пайке вручную припой обычно подают к шву с внешней стороны; при автоматической пайке, или при пайке в печах, или в соляных ваннах припой предварительно укладывают около зоны соединения. В некоторых случаях бывает удобно перед пайкой нанести припой на соединяемые детали заранее, например окунанием в расплавленный припой, гальваническим и химическим покрытием или металлизацией. Толщина покрытия при этом должна быть такой, чтобы после сборки узла и нагрева его до температуры плавления припой мог полностью заполнить шов.

Для получения надежной пайки припой желательно располагать над паяемым швом, в этом случае после расплавления он втягивается в зазор капиллярными силами и силой тяжести (рис. 6.8). Если при этом припой растекается по плечу, кольцо несколько приподнимают над швом; тогда припой по мере расплавления будет стекать по цилиндрической части и весь уходить в зазор. При расположении его горизонтально кольцо должно быть очень плотно прижато к зазору, чтобы капиллярные силы могли втянуть в него расплавленный припой. При пайке с заранее уложенным припоем, кроме всего прочего, учитывают метод нагрева. Наружное расположение, например, в виде кольца на внешнем диаметре, целесообразно применять при пайке в печах или при индукционном нагреве, а внутреннее расположение — при пайке в соляных ваннах или при газопламенном нагреве.

Предварительно уложенный припой следует размещать так, чтобы при расплавлении он мог вытеснять из зазора флюс и воздух. Припой в виде фольги перед пайкой закладывают непосредственно внутрь шва. Шов при этом должен быть обязательно открытым, а паяемые детали во время расплавления припоя должны перемещаться одна относительно другой (рис. 6.9).

Для пайки продольных швов может быть использован припой в виде прутка или прямой проволоки. Шов при такой пайке располагают горизонтально; при вертикальном расположении шва очень трудно получить качественную пайку, так

как припой под действием силы тяжести вытечет и не заполнит шов. Количество припоя следует брать такое, чтобы в месте соединения образовалась галтель.

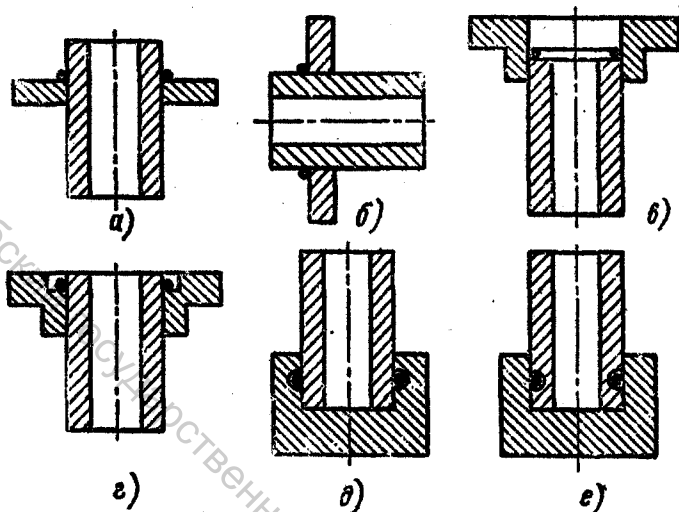


Рис. 6.8. Расположение припоя перед пайкой в виде кольца:

а – при вертикальном шве; б – при горизонтальном шве; в – втулка, выступающая над концом трубы; г – кольцо помещено в канавку втулки; д, е – кольцо помещено в выточку внутри шва

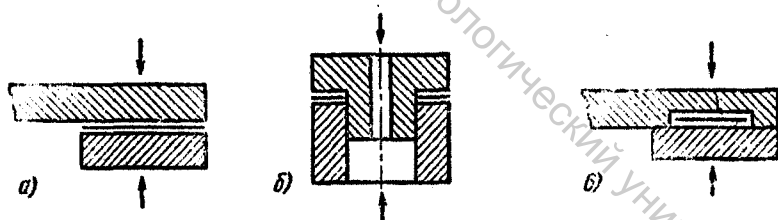


Рис. 6.9. Припой расположен в виде фольги:

а и б – правильно; в – неправильно

Современные методы пайки обеспечивают:

- соединение конструкционных материалов с различными физико-химическими свойствами;
- сохранение или незначительное изменение исходных свойств основных материалов после пайки;

- получение прочности, надежности и коррозионной стойкости паяных соединений, соизмеримых с аналогичными свойствами основных материалов;
- выполнение одновременно нескольких соединений, независимо от их протяженности и формы сопрягаемых деталей, с последующей частичной или полной разборкой паяной конструкции;
- получение соединений в недоступных местах или местах с затрудненными подходами;
- соединение тонкостенных деталей, а также деталей различной толщины;
- совмещение процесса пайки с термической обработкой;
- получение галтелей в местах соединений с расчетными радиусами закругления;
- достижение необходимой точности паяной конструкции без существенной заключительной обработки швов, допустимость правки.

В процессе пайки припой затекает одновременно во все соединительные зазоры под действием только капиллярных сил, которые невозможно использовать при сварке. Следовательно, пайка является наиболее скоростным и наименее трудоемким способом соединения изделий.

При производстве тонкостенных конструкций пайка обеспечивает минимальную деформацию при весьма экономном использовании конструкционного материала и электрической энергии.

Поэтому в крупносерийном производстве, например, электротехнических деталей, снижение затрат на изготовление паяных изделий по сравнению с прочими способами соединения составляет 58—94% в зависимости от их конфигурации.

В зависимости от вида конструкции и ее назначения пайку можно применять при соединении плоских, стержневых и трубчатых элементов, криволинейных поверхностей между собой и с плоскими.

Конструкция паяных соединений плоских элементов наиболее простая (рис. 6.10). Соединения внахлестку (рис. 6.10, а) наиболее распространены, так как позволяют изменением величины перекрытия деталей достигать равнопрочности паяного соединения. Величину нахлестки устанавливают расчетом в зависимости от прочности основного материала и припоя. Практически применяемая величина нахлестки составляет  $(2 - 5)\delta$ , где  $\delta$  — толщина более тонкой из соединяемых деталей. В тех случаях, когда с одной стороны соединение необходимо сохранить плоским, применяют нахлестку, образуемую подгибкой одного из со-

единяемых элементов. После пайки плоскую сторону таких соединений обычно выравнивают заполнением щели, образуемой кромками соединяемых листов, низкотемпературными припоями.

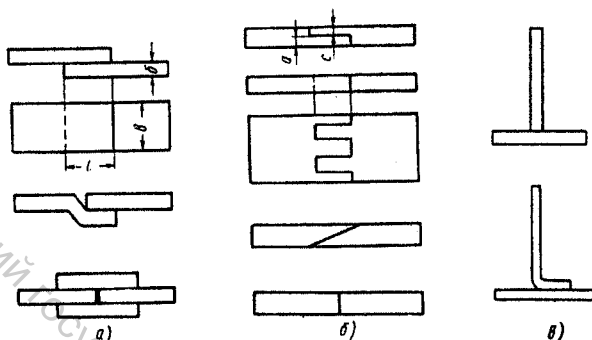


Рис. 6.10. Соединение плоских элементов деталей при пайке

а – соединения внахлестку; б – стыковые соединения; в – тавровые соединения

Для более симметричного распределения нагрузок и повышения прочности иногда применяют соединения с накладками с двух сторон.

В тех изделиях, в которых необходимо сохранить толщину стенки неизменной или где применение обычного нахлесточного соединения невозможно, применяют ступенчатые, гребенчатые, косостыковые и стыковые паяные соединения (рис. 6.10, б).

Ступенчатые и гребенчатые соединения, наряду с сохранением сечения соединяемых элементов деталей, обеспечивают высокую прочность, но требуют сложной подготовки кромок, поэтому их применяют только в ответственных конструкциях.

При использовании косостыковых соединений довольно трудно обеспечить плотное прилегание паяемых поверхностей, поэтому их применяют редко, например, при пайке ленточных пил. Косой стык следует делать под углом не более  $30^\circ$ , иначе площадь пайки будет мала и, следовательно, прочность соединения недостаточна.

Стыковые соединения в паяных изделиях применяют мало, так как они лишь в редких случаях обеспечивают равнопрочность конструкции.

Соединения тавровые (рис. 6.10, в) не характерны для паяных конструкций, но применение их иногда необходимо из соображений компоновки изделий.

Более высокую прочность имеют тавровые соединения с подгибкой вертикального элемента, увеличивающей площадь паяного шва.

Соединения стержней и труб между собой: соединения стержней и труб с фланцами, втулками показаны на рис. 6.11.

Наиболее простое соединение стержней между собой (рис. 6.11, а)— применение охватывающей втулки. Стыковое соединение стержней недостаточно прочно. Более прочное соединение — сочетание стыкового с втулочным.

При соединении труб (рис. 6.11, б) применение втулки также рационально. Для труб втулку можно устанавливать внутри в виде бужа, что позволяет наружное сечение трубы по шву сохранить неизменным. Если нужно сохранить неизменным внутреннее сечение паяемого трубопровода, то применяют телескопическое соединение, получаемое развальцовкой концов одной или обеих труб. Во втором случае при соединении используют переходную втулку. Если необходимо сохранить и наружное, и внутреннее сечение трубы по месту соединения постоянным, то применяют пазовое соединение (ребенчатое). Однако это соединение в выполнении очень сложно, вызывает затруднения при сборке и пайке, поэтому его используют редко. Иногда применяют соединение, которое позволяет вносить припой при сборке, между паяемыми поверхностями, что обеспечивает более равномерный пропай, но уменьшает внутреннее сечение трубы.

Конструктивные формы соединений стержней и труб с фланцами, втулками в значительной мере определяются конфигурацией изделия (рис. 6.11, в). Во всех случаях учитывают, что прочность паяных соединений будет обеспечена только при наличии достаточной нахлестки. Размер площади поверхностей фланцев, втулок, контактирующих со стержнями и трубами, необходимо определять расчетом в соответствии с требуемой прочностью.

Соединения криволинейных поверхностей между собой и с плоскими нашла большое распространение в связи с производством сотовых конструкций и паяных панелей с гофрированными проставками, которые широко используют в самолетостроении и для изготовления теплообменников. Схематичное изображение этих типов паяных соединений приведено на рис. 6.12. В первом примере (рис. 6.12, а) плоские листы с гофрированной проставкой соединяют по вершинам гофр. Во втором случае (рис. 6.12, б) пайка происходит в местах касания гофрированных лент, образующих сотовый наполнитель между собой, а также в местах соединения торцов сотового наполнителя с листовой обшивкой. Встречаются так-

же конструкции, в которых трубы соединяют между собой по образующей или припаивают к плоским листам.

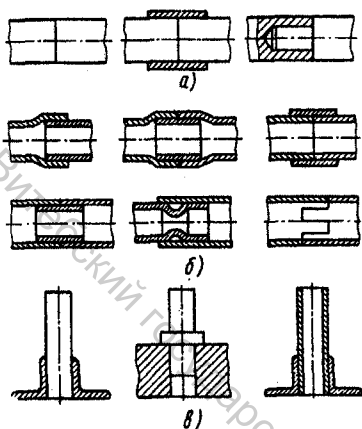


Рис. 6.11. Соединение стержневых и трубчатых элементов деталей при пайке между собой и с плоскими элементами:  
а – соединение стержней, б – соединение труб;  
в – соединение стержней и труб с фланцами

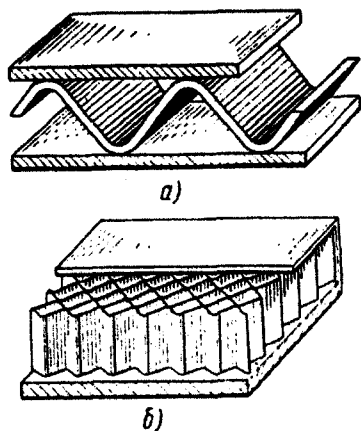


Рис. 6.12. Соединение криволинейных элементов при пайке между собой и с плоскими элементами:  
а – соединение плоских листов с гофрированной проставкой; б – соединение плоских листов с сотовой проставкой

#### 6.4. Дефекты пайки

При изготовлении паяных изделий образующиеся дефекты можно разделить на три группы: дефекты заготовок и сборки изделия под пайку, дефекты паяных швов и дефекты готового паяного изделия. Характерными дефектами сборки являются неравномерность зазора между соединяемыми поверхностями и смещение элементов паяемого изделия. Эти дефекты возникают вследствие неточной обработки заготовок, смещения их в процессе закрепления при сборке, отсутствия приспособлений, обеспечивающих надежную фиксацию изделия и отдельных его узлов.

Дефектами паяных соединений чаще всего бывают непропай, трещины, поры, раковины, шлаковые и флюсовые включения.

Непропай возникает в результате плохого смачивания паяемого металла припоем. Чтобы избежать этого, необходимы тщательная предварительная очистка места соединения, использование более активных флюсов и соответствующих припоев, строгий контроль величины зазора.

Трещины возникают под действием напряжений в основном металле или вследствие вибрации паяемой конструкции в процессе пайки. Различают горячие и холодные трещины. Горячие образуются в процессе кристаллизации и усадки припоя при высоких температурах, холодные — при температурах до 200° С. Трещины могут образовываться в шве паяного соединения, в паяемом металле и по линии раздела припоя — паяемый металл.

В паяном шве трещины возникают вследствие усадки при кристаллизации. В паяемом металле трещины появляются под действием собственных напряжений и под действием расплавленного припоя, который проникает по границам зерен паяемого металла и ослабляет связи между ними. Трещины по поверхности раздела припоя — паяемый металл имеют место при пайке разнородных металлов.

В паяном шве, вследствие испарения компонентов флюса и припоя, плохой подготовки поверхности соединения, при длительном нагреве во время пайки могут образоваться поры, усадочные раковины и шлаковые включения.

К дефектам готового паяного изделия относятся деформации и коробления, вызванные неравномерными нагревом и охлаждением в процессе пайки, а также некачественной сборкой изделия под пайку.

Чтобы предотвратить образование дефектов в паяных соединениях, необходим тщательный контроль всех операций пайки. Качество сборки и скрепления изделий перед пайкой следует проверять визуально. Тщательность очистки и обезжиривания поверхности проверяют по растеканию на ней капли чистой воды. Составы обезжиривающих и травильных ванн, флюса и припоя должны контролироваться периодически.



### Глава 1

1. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки. – М.: Машиностроение, 1989.
2. Вайнтрауб Д.А., Клепиков Ю.М. Холодная штамповка в мелкосерийном производстве. – Л.: Машиностроение, 1975.
3. Васильев Д.И., Тылкин М.А., Тетерин Г.П. Основы проектирования деформирующего инструмента. – М.: Высш. шк., 1984.
4. Зубцов М.Е. Листовая штамповка, –Л.: Машиностроение, 1980.
5. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. – М.: Машиностроение, 1967.
6. Мещерин В.Т. Листовая штамповка. Атлас схем. – М.: Машиностроение, 1975.
7. Мошин Е.Н. Гибка, обтяжка и правка на прессах. – М.: Машгиз, 1959.
8. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977.
9. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – Л.: Машиностроение, 1979.
10. Смирнов Г.В. Современный метод листовой вырубки деталей приборов.
11. Степанченко В.А. Импульсная штамповка в машиностроении. Киев, 1969.
12. Шипилов А.Н., Шульга С.А. Формоизменение секционным разжимным инструментом. Учебное пособие, Ростов, 1990.
13. Гибкие технологические системы холодной штамповки / С.П. Митрофанов, Л.Л. Григорьев, Ю.М. Клепиков и др.; Под общ. ред. С.П. Митрофанова. – Л.: Машиностроение, 1987.
14. Перспективные технологические процессы холодной штамповки / Ф.В. Гречников, А.М. Дмитриев, В.Д. Кухарь и др.; Под общ. ред. А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1984.
15. Рекомендации по применению технологических процессов чистовой вырубки заготовок. – Воронеж: Изд-во ЭНИКМАШ, 1976.
16. Холодная штамповка в мелкосерийном производстве. Справочное пособие/ Под общ. ред. С.П. Митрофанова.

### Глава 2

1. Атрошенко А.П., Федоров В.И. Металлосберегающие технологии кузнечно-штамповочного производства. – Л.: Машиностроение, 1990.
2. Барановский М.А. Новая технология и оборудование штамповочного производства. – Мн.: Беларусь, 1981.
3. Боговаленский К.Н. и др. Гидропластическая обработка металлов. Л.: Машиностроение, 1988.
4. Брюханов А.Н. Ковка и объемная штамповка. – М.: Машиностроение, 1960.
5. Васильчиков М.В. Поперечно-винтовая прокатка изделий с винтовой поверхностью. М.: Машиностроение, 1968.
6. Вереснев Б.И. и др. Физические основы и практическое применение гидроэкструзии. М.: Наука, 1981.
7. Ганаго О.А., Сегал В.М. Технологические расчеты в объемной штамповке. М.: Машиностроение, 1983.
8. Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства. – М.: Машиностроение, 1976.
9. Перлин И.Л., Райтборг Л.Х. Теория прессования металлов. М.: Металлургия, 1975.
10. Суворов И.К. Обработка металлов давлением. М.: Высшая школа, 1973.
11. Шевкин Ю.Ф. и др. Прессование тяжелых цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1987.
12. Щукин В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки. Минск. – Наука и техника, 1986.
13. Ковка и объемная штамповка стали. Справочник в 2-х томах под ред. Сторожева Н.В. – М.: Машиностроение, 1965-1968.
14. Штампы для горячего деформирования металлов. Учебное пособие под ред. Тылкина М.А. – М.: Машиностроение, 1977.

### Глава 3

1. Белов С.В. и др. Пористые проницаемые материалы. Справочник. М.: Металлургия, 1987.
2. Джеймс П.Д. Процессы изостатического прессования. М.: Металлургия, 1990.
3. Злобин Г.П. Формование изделий из порошков твердых сплавов. М.: Металлургия, 1980.
4. Кипарисов С.С. Оборудование предприятий порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1988.

5. Клячко Л.И. Оборудование и оснастка для формирования порошковых материалов. М. Металлургия, 1986.
6. Либенсон Г.А. Основы порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1987.
7. Ложечников Е.Б. Прокатка в порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1987.
8. Реут О.П. и др. Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов. Минск.: 1998
9. Роман О.В., Аруначалам В.С. Актуальные проблемы порошковой металлургии. М. Металлургия, 1990.
10. Третьяков В.И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. М.: Металлургия, 1976.
11. Федорченко И.М. и др. Порошковая металлургия. Справочник. Киев: Наукова думка, 1985
12. Шатт В. Порошковая металлургия. М.: Металлургия, 1983.

#### **Глава 4**

1. Батышев А.И. Кристаллизация металлов и сплавов под давлением. Л.: Металлургия, 1971.
2. Бедель В.К., Тимофеев Г.И., Литье под низким давлением. М.: Машиностроение, 1968.
3. Белопухов В.К. Технологические режимы литья под давлением. М.: Машиностроение, 1985.
4. Вейник А.И. и др. Литье в кокиль. М.: Машиностроение, 1980.
5. Горюнов И.И. Пресс-формы для литья под давлением. Справочное пособие. Л. Машиностроение.
6. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Байко Г.А. Электрошлаковое литье. Киев.: Наукова думка, 1980.
7. Руденко А.Б., Серебро В.С. Литье в облицованный кокиль. М.: Машиностроение, 1987.
8. Серебро В.С., Марьянский А.В. Прогрессивные технологические процессы изготовления оболочковых форм. М.: ВНИИТЭМР, 1986.
9. Степанов и др. Технология литейного производства. Учебник. М.: Машиностроение, 1983.
10. Шкленник Я.И. Литье по выплавляемым моделям. М.: Машиностроение, 1984.
11. Юдин С.Б. и др. Центробежное литье. М.: Машгиз, 1962.
12. Специальные способы литья. Справочник под ред. Ефимова В.А. М.: Машиностроение, 1991.
13. Цветное литье. Справочник / под ред. Галдина Н.М. М.: Машиностроение, 1989

#### **Глава 5 - 6**

1. Вилль В.И. Сварка металлов трением. Л.: Машиностроение, 1970.
2. Гельман А.С. Основы сварки давлением. М.: Машиностроение, 1970.
3. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением. М.: Машиностроение, 1973.
4. Кабанов Н.С., Слепак Э.С. Технология стыковой контактной сварки. М.: Машиностроение.
5. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка в вакууме. М.: Машиностроение, 1976.
6. Лашко Н.Ф., Лашко С.В. Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1977.
7. Новожилов Н.М. Основы металлургии дуговой сварки в активных защитных газах. М.: Машиностроение, 1972.
8. Потальевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. М.: Машиностроение, 1974.
9. Седых В.С., Казак Н.Н. Сварка взрывом и свойства сварных соединений.
10. Чулошников П.Л. Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1974.
11. Справочник по пайке/Под ред. С.Н. Лоцманова. М.: Машиностроение, 1975.
12. Сварка в машиностроении. Справочник/ под. Ред. Ольшанского Н.А., М.: машиностроение, 1978.
13. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением/ Под ред. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение, 1974,

# Предметный указатель

## Б

Бобышка 148  
Брак при спекании 233

## В

Вальцовка 124  
Волочение 150  
Вырубка чистовая 15-18  
Вытяжка 36  
Вытяжка с утонением 45  
Вытяжка гидромеханическая 51  
Вытяжка ротационная 51, 52  
Вытяжка с подогревом и охлаждением 49

## Г

Гибка 26  
Гибка с растяжением 33  
Гибка со сжатием 35  
Гидропрессование 141  
Грат 341

## Д

Давление боковое 180  
Давление выталкивания 180

## З

Зачистка 19, 20

## К

Калибрование заготовок порошковых 185  
Классификация порошков 175  
Кокиль 264  
Конструирование формообразующего инструмента 186  
Конструкции кокилей 266

## Л

Литье вакуумным всасыванием 274  
Литье под низким давлением 271  
Литье с противодавлением 273  
Лужение 366

## М

Матрица 20  
Механизм резки на ножницах 10  
Модели 255  
Модели выплавляемые 260

## Н

Накатка зубчатых колес 133  
Накатка резьбы 134

## О

Обжим 57  
Операции разделительные листовой штамповки 7  
Операции формоизменяющие листовой штамповки 8  
Оребрение отливок 313  
Отбортовка отверстий 52  
Отбортовка с утонением 56

## П

Пайка в печах 367  
Пайка волной припой 372  
Пайка индукционная 367  
Пайка капиллярная 365  
Пайка контактно-реактивная 366  
Пайка погружением в припой 371  
Пайка электродуговая 368  
Плоскость разъема штампов 98  
Подрезка 299  
Последствие упругое 181  
Прессование 134  
Прессование безокислительное 141  
Прессование гидростатическое 203  
Прессование двустороннее 183  
Прессование изделий плавнопеременного сечения 137  
Прессование изделий ступенчатых 139  
Прессование с боковым истечением 136  
Прессование с обратным истечением 136  
Прессование с прямым и обратным истечением 137  
Пробивка чистовая 15, 16, 17, 18  
Проектирование поковок 157  
Прокатка дискретная 224  
Прокатка поперечно-клиновная 126  
Прокатка порошков 220  
Профилирование 31  
Прочность прессовок 182  
Пружинение при гибке 29

## Р

Раздача 60  
Раздача разжимным инструментом 61, 62  
Разъем форм 303  
Раскатка 131  
Раскрой 22, 23

Расчет геометрических параметров при обжиме 58, 59  
 Расчет геометрических параметров при раздаче 60, 61  
 Расчет заготовки при вытяжке 41, 42, 43  
 Расчет заготовки при гибке 27  
 Расчет конструктивных параметров при вытяжке 38, 48  
 Расчет конструктивных параметров при вытяжке с утонением 48, 57  
 Расчет конструктивных параметров при отбортовке 55, 56  
 Расчет операций при вытяжке 38, 39, 40  
 Расчет размеров матриц при вырубке 21, 22  
 Расчет размеров матриц при вытяжке 44, 45  
 Расчет размеров пуансонов при вырубке 20, 21  
 Расчет размеров пуансонов при вытяжке 44, 45  
 Расчет силовых параметров при гибке 30  
 Резание при вырубке 13, 14  
 Резание при пробивке 13, 14  
 Резка на ножницах 9  
 Резка проката анодно-механическая 87  
 Резка проката газовая 84  
 Резка проката пилами 86  
 Резка проката на ножницах 81  
 Резка проката на холодноломах 82  
 Ручьи штампов 101, 102, 103

## С

Сварка инерционная трением 346  
 Сварка механизированная 328  
 Сварка орбитальная трением 346  
 Сварка ручная дуговая 325  
 Сварка радиальная трением 340  
 Сварка точечная 338  
 Сверхпластичность 91, 92, 93  
 Свойства сплавов 250  
 Свойства порошков технологические 174  
 Свойства порошков физические 173  
 Свойства порошков химические 171  
 Смешивание порошков 176  
 Сплавы литейные 249  
 Схемы резки 12, 13

## У

Уплотнение порошков в закрытой пресс-форме 177  
 Усилие резания 11

## Ф

Формы песчаные 253  
 Формование газостатическое горячее 210  
 Формование гидродинамическое 218  
 Формование изостатическое 206  
 Формование импульсное 215  
 Формование инжекционное 230  
 Формование мундштучное 227  
 Формование сыпучей средой 214

Формование шликерное 230  
 Формовка машинная 256  
 Формовка ручная 255

## Ш

Штамповка в вальцах 125  
 Штамповка импульсная 65  
 Штамповка в закрытых штампах 104  
 Штамповка в открытом штампе 94  
 Штамповка взрывом 65  
 Штамповка выдавливанием 105  
 Штамповка комбинированная 62  
 Штамповка магнитно-импульсная 70  
 Штамповка на машинах горизонтально-ковочных 115  
 Штамповка на молотах 108  
 Штамповка на прессах гидравлических 118  
 Штамповка на прессах гидравлических многоплунжерных 121  
 Штамповка на прессах кривошипных 112  
 Штампы для выдавливания 107  
 Штампы для штамповки порошковых заготовок 196  
 Штамповка электрогидроимпульсная 67

## Э

Элементы штампа для объемной штамповки 104

Библиотека ВГТУ



Учебное издание  
**Клименков Степан Степанович**

**Проектирование и производство заготовок**  
**Учебник**

Редактор Матвеева Н.Н.  
Технический редактор Пятов В.В.  
Коректор Лабусова И.П.  
Компьютерная верстка Матвеева Н.Н.

Подписано в печать 19.01.05 Формат 60х84/16 Бумага офсетная № 1  
Усл.печ.л. 24 Уч.-изд.лист. 20 Тираж 213 экз. Заказ № 30  
УО «Витебский государственный технологический университет» Лицензия  
№ 02330/0133005; 210035, Витебск, Московский пр-т, 72.  
Отпечатано на ризографе УО «Витебский государственный технологический  
университет». Лицензия № 02330/0133005 от 1.04.2004 г.