

МИНИСТЕРСКОГО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра технологии металлов

**В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, В. Р. Калиновский**

## **ГОРЯЧАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по образованию в области сельского хозяйства в качестве  
учебно-методического комплекса для студентов учреждений  
высшего образования группы специальностей 74 06 Агроинженерия*

Минск  
БГАТУ  
2012

УДК 620.22 (07)  
ББК 30.3я7  
К 20

Рецензенты:

кафедра «Материаловедение и технология металлов»  
учреждения образования «Белорусский государственный  
технологический университет»;  
главный научный сотрудник кафедры «Новые материалы  
и технологии» ИПК и ПК БНТУ, доктор технических наук,  
профессор *Л. С. Богинский*

**Капцевич, В. М.**

К20 Горячая обработка металлов : учебно-методический комплекс / В. М. Капцевич, В. К. Корнеева, В. Р. Калиновский. – Минск: БГАТУ, 2012. – 444 с.  
ISBN 978-985-519-551-2.

УДК 620.22 (07)  
ББК 30.3я7

ISBN 978-985-519-551-2

© БГАТУ, 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>МОДУЛЬ 1. ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО</b> .....	7
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ МОДУЛЯ 1 .....	9
1. Производство металлов .....	9
2. Литье в песчано-глинистые формы .....	34
3. Литейные сплавы .....	52
4. Специальные способы литья .....	81
МАТЕРИАЛЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ .....	110
Лабораторная работа 1. Технологические испытания формовочных смесей .....	110
Лабораторная работа 2. Изготовление разовой песчано-глинистой литейной формы .....	116
Лабораторная работа 3. Анализ свойств отливок, полученных различными способами литья .....	120
МАТЕРИАЛЫ К УПРАВЛЯЕМОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ	
Тема «Проектирование разовой песчано-глинистой формы для конкретной детали» .....	124
РАЗНУРОВНЕВЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО МОДУЛЮ 1 .....	126
<b>МОДУЛЬ 2. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.</b>	135
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ МОДУЛЯ 2 .....	137
1. Физические основы пластической деформации .....	137
2. Получение машиностроительных профилей .....	154
3. Получение машиностроительных заготовок .....	181
МАТЕРИАЛЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ .....	214
Лабораторная работа 1. Изменение механических свойств и структуры металлов при пластической деформации .....	214
Лабораторная работа 2. Определение основных параметров, характеризующих деформацию металла, и условий захвата заготовки валками при продольной прокатке .....	217

Лабораторная работа 3. Влияние степени деформации металла на его механические свойства при волочении	221
<b>МАТЕРИАЛЫ К УПРАВЛЯЕМОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ</b>	
Тема «Разработка технологического процессаковки конкретной детали» .....	223
<b>РАЗНОУРОВНЕВЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО МОДУЛЮ 2</b> .....	235
<b>МОДУЛЬ 3. СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</b> .....	244
<b>ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ МОДУЛЯ 3</b> .....	246
1. Физические основы сварки. дуговые методы сварки	246
2. Газовая сварка. контактные способы сварки .....	284
3. Специальные способы сварки. резка, пайка, наплавка и напыление металлов .....	307
<b>МАТЕРИАЛЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ</b> .....	405
Лабораторная работа 1. Изучение структуры сварного соединения .....	405
Лабораторная работа 2. Расчет процесса точечной сварки и оценка качества сварного соединения .....	407
Лабораторная работа 3. Анализ структуры и механических свойств паяного соединения .....	412
<b>МАТЕРИАЛЫ К УПРАВЛЯЕМОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ</b>	
Тема «Разработка технологического процесса ручной дуговой сварки сварного узла» .....	414
<b>РАЗНОУРОВНЕВЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО МОДУЛЮ 3</b> .....	432
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	440

## ВВЕДЕНИЕ

Раздел «Горячая обработка металлов» является частью дисциплины «Материаловедение. Технология конструкционных материалов», которая относится к циклу общепрофессиональных дисциплин и входит в учебные планы, подготовленные в соответствии с общеобразовательными стандартами Республики Беларусь для группы специальностей 74 06 Агроинженерия.

Предметом раздела «Горячая обработка металлов» является изучение процессов производства металлов и сплавов, изготовления заготовок и деталей методами литья, обработки давлением и сварки, способов их упрочнения наплавкой и напылением.

В результате изучения раздела «Горячая обработка металлов» студент должен:

– *знать* способы производства металлов, методы получения деталей различными методами литья, литейные сплавы и их свойства, физические основы пластической деформации, технологию, оборудование и инструмент основных видов обработки металлов давлением, сущность основных видов сварки плавлением и сварки давлением, технологию пайки материалов, напыления и наплавки;

– *уметь* осуществлять выбор методов литья, оборудования и другой технологической оснастки в зависимости от условий реализации процесса, выбор вида обработки металлов давлением, оборудования и инструмента в зависимости от условий реализации процесса, выбор вида сварки, оборудования и другой технологической оснастки в зависимости от условий реализации процесса.

В учебно-методическом комплексе описаны физико-химические основы того или иного метода горячей обработки, приводятся наиболее значимые способы реализации каждого из них, описываются конструктивные особенности используемого оборудования и инструмента. Приводятся конкретные примеры использования того или иного способа горячей обработки для получения различных машиностроительных деталей, в том числе для сельскохозяйственной техники.

Структура учебно-методического комплекса основана на учебной модульно-рейтинговой программе, разработанной кафедрой «Технология металлов» БГАТУ. Учебно-методический комплекс состоит из трех самостоятельных модулей: «Основы металлургических процессов и литейное производство», «Обработка металлов

давлением», «Сварочное производство и родственные технологии». В каждом из модулей приведен тематический план, теоретический материал, материалы для лабораторных работ и самостоятельной работы студентов. Излагаемый материал каждого модуля заканчивается разноуровневыми заданиями, которые должны выполнить студенты при контроле знаний по модулю.

Учебная программа изучения дисциплины предусматривает изучение раздела «Горячая обработка металлов» согласно тематическому плану, представленному ниже.

**Тематический план раздела  
«Горячая обработка металлов»**

Номер и наименование модуля	Общее количество аудиторных часов на модуль	В том числе		
		Лекции (ч)	Лабораторные занятия (ч)	УСРС (ч)
М-1 Основы металлургических процессов и литейное производство	18	8	6	4
М-2 Обработка металлов давлением.	16	6	6	4
М-3 Сварочное производство и родственные технологии	18	6	8	4
<b><i>Итого по разделу</i></b>	<b>52</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>12</b>

## МОДУЛЬ 1. ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

В результате изучения модуля студент должен:

- **знать** методы получения металлов из руд, методы получения деталей различными методами литья, литейные сплавы и их свойства;
- **уметь** осуществлять выбор методов литья, оборудования и другой технологической оснастки в зависимости от условий реализации процесса.

### Тематический план модуля 1

Наименование занятия, перечень основных вопросов	Количество аудиторных часов			
	Всего	Лекции	Лабораторные занятия	УСРС
<i>1</i>	2	3	4	5
<p><i>Производство металлов</i></p> <p>1. Общие сведения о металлургическом производстве. 2. Производство чугуна. 3. Производство стали. 4. Производство меди. 5. Производство алюминия</p>	2	2		
<p><i>Литье в песчано-глинистые формы</i></p> <p>1. Сущность литейного производства. 2. Литейная оснастка для изготовления песчано-глинистой формы. 3. Формовочные и стержневые смеси. 4. Технология изготовления форм и получения отливок</p>	2	2		
<p><i>Технологические испытания формовочных смесей</i></p> <p>1. Приготовление формовочных смесей. 2. Определение свойств формовочных смесей: методика определения газопроницаемости и прочности</p>	2		2	
<p><i>Изготовление разовой песчано-глинистой литейной формы</i></p> <p>1. Приготовление песчано-глинистой смеси. 2. Изготовление разовой литейной формы</p>	2		2	

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Проектирование разовой песчано-глинистой формы для конкретной детали (управляемая самостоятельная работа студентов)</i>	2			2
<i>Литейные сплавы</i> 1. Литейные свойства сплавов. 2. Производство отливок из чугуна. 3. Производство отливок из стали. 4. Производство отливок из сплавов на основе меди. 5. Производство отливок из алюминиевых сплавов	2	2		
<i>Специальные способы литья</i> 1. Литье по выплавляемым моделям. 2. Литье в оболочковые формы. 3. Литье в кокиль. 4. Литье под давлением. 5. Центробежное литье. 6. Другие способы литья. 7. Сравнительная характеристика различных способов литья	2	2		
<i>Анализ свойств отливок, полученных различными способами литья</i> 1. Изготовление песчано-глинистой формы. 2. Подготовка кокиля к работе. 3. Подготовка расплавленного металла и заливка формы. 4. Сравнение отливок, полученных при литье в кокиль и песчано-глинистую форму	2		2	
<i>Контроль по модулю</i>	2			2
<b><i>Итого по модулю 1</i></b>	<b>18</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>4</b>

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ МОДУЛЯ 1

## 1. ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛОВ

### 1.1. Общие сведения о металлургическом производстве

Металлургия в первоначальном значении — искусство извлечения металлов из руд. Возникла металлургия в глубокой древности: при раскопках были найдены следы выплавки меди, датированные 7–6-м вв. до н.э.

На следующем этапе развития металлургии человек научился получать из руд железо. К 1-му тысячелетию н.э. железо стало наиболее распространенным среди используемых человеком материалов. К середине 14 века появились первые доменные печи. В Англии в 1740 г. появилась тигельная плавка — первый способ производства стали. В 1856 г. был впервые осуществлен бессемеровский, в 1864 г. — маргеновский, а в 1878 г. — томасовский процессы производства стали.

Медь начали массово производить, когда в 1866 г. Семенников В. А. изобрел конвертирование штейна.

Металлургия — наука, изучающая теоретические и технологические основы промышленных способов получения металлов и сплавов. Некоторые металлы (золото, платина, серебро, медь) могут встречаться в виде самородных, остальные металлы входят в состав различных минералов (горных пород) в виде оксидов, сернистых, углекислых и других химических соединений. Общее содержание металлов (по массе) в земной коре составляет около 15 %, в том числе: алюминия — 7,45 %, железа — 4,2 %, магния — 2,1 %, титана — 1 %, хрома — 0,02 %, меди — 0,01 %, никеля — 0,008 %.

Все процессы, которые лежат в основе получения металлов и сплавов из химических соединений, подразделяют на две основные группы: пирометаллургические и гидрометаллургические.

**Пирометаллургические процессы** — высокотемпературные способы получения металлов и сплавов, осуществляемые при сжигании топлива, экзотермических реакциях, термической диссоциации летучих соединений, металлотермии (алюмотермии, магнийтеермии), электроплавке, электролизе расплавов и т. п.

**Гидрометаллургические процессы** — способы получения металла посредством выделения его из растворов без нагрева до высокой температуры (ниже 300 °С). Данный метод, например, используют для извлечения меди из бедных окисленных и самород-

ных руд слабыми растворами серной кислоты с последующим выделением из раствора металлической меди.

Иногда в отдельную группу выделяют *электрометаллургические процессы*, основанные на получении металлов или сплавов при помощи электрического тока. При этом данные процессы могут являться либо пирометаллургическими (когда для извлечения металлов из руд и концентратов, их производства и рафинирования используется тепловой эффект электрических явлений), либо гидрометаллургическими, основанными на электролизе водных растворов.

**Материалы, необходимые для осуществления металлургических процессов.** Исходными материалами для производства металлов являются шихтовые материалы и огнеупоры.

**Шихтой** называют совокупность исходных материалов, необходимых для плавки, взятых в рассчитанном массовом соотношении. При производстве металлов в состав шихты входят руды или исходные металлы, топливо и флюсы.

**Руда** — это природное минеральное сырье, содержащее металлы или их соединения в концентрациях и формах, приемлемых для промышленного использования. Помимо соединений извлекаемого металла, руда содержит пустую породу, в составе которой нужный металл отсутствует. Например, железные руды могут содержать лишь до 50...60 %, а медные — 2...4 % основного элемента в исходном сырье.

**Топливо** может являться не только источником тепла, но и реагентом, восстанавливающим металл из его оксидов и других соединений. Основными видами топлива при производстве металлов являются каменный уголь, кокс, природный газ, мазут и др. Топливо содержит свободный углерод, углеводороды, соединения серы, кислорода, азота, различные минеральные соединения, переходящие при сгорании в золу, и др.

**Флюсы** — это материалы, вводимые в шихту, которые в процессе плавки взаимодействуя с пустой породой руды, золой топлива и вредными примесями, образуют легкоплавкий шлак.

**Огнеупоры** — это материалы и изделия на основе минерального сырья, обладающие способностью противостоять действию высоких температур (выше 1 500 °С). Они применяются для создания защитной внутренней облицовки (футеровки) металлургических печей, разливочных ковшей, химических аппаратов, ванн и т. д.

Помимо высокой термостойкости огнеупоры должны обладать химической стойкостью, контактируя с жидким металлом, и постоянством объема при резких перепадах температур.

**Подготовка шихты** включает обогащение руды, агломерацию и окатывание.

Процесс **обогащения руды** состоит из следующих основных этапов:

1) дробление и сортировка руд по крупности с целью получения оптимальных для плавки размеров кусков руды;

2) обогащение руды — получение концентрата с более высоким содержанием металла.

При обогащении руд используются способы, базирующиеся на различии физико-химических свойств содержащихся в руде минералов по сравнению с пустой породой (плотности, магнитной восприимчивости, смачиваемости поверхности различными жидкостями). К этим способам относятся промывка руды, гравитационное обогащение, магнитная сепарация и флотация.

**Агломерация** — это процесс изготовления кускового пористого офлюсованного материала (агломерата), заключающийся в спекании шихты. При агломерации одновременно происходит удаление из шихты вредных примесей (сера, частично мышьяк и др.).

**Окатывание** — это процесс окатывания измельченной и увлажненной шихты во вращающихся барабанах с последующим обжигом полученных шарообразных комков (окатышей) в шахтной печи.

## 1.2. Производство чугуна

**Чугун** — железоуглеродистый сплав, содержащий более 2,14% С, до 2% Mn, до 4% Si, а также P и S. В легированных чугунах могут быть и другие элементы. Чугун является конструкционным литейным материалом и исходным материалом для получения стали.

**Исходные материалы для доменного процесса.** Чугун выплавляется в доменных печах. Исходными материалами для его получения являются железные руды, топливо, флюсы и огнеупоры.

**Железные руды** — природные минералы, содержащие оксиды железа и пустую породу. В состав пустой породы входят оксиды

кремния  $\text{SiO}_2$  (кремнезем), алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (глинозем), кальция  $\text{CaO}$  и магния  $\text{MgO}$ . Содержание Fe в рудах составляет 30...65 %.

Для получения чугуна используются следующие виды железных руд:

1) *магнитный железняк (магнетит)*, содержащий до 70 % Fe в виде оксидов FeO (магнитная окись железа) и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;

2) *красный железняк (гематит)*, содержащий 55...60 % Fe в виде оксида  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;

3) *бурый железняк (гетит)*, содержащий 30...50 % Fe в виде водного оксида железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ;

4) *шпатовый железняк (сидерит)*, содержащий 30...40 % Fe в виде карбоната  $\text{FeCO}_3$ .

В настоящее время для выплавки чугуна используется железная руда, прошедшая предварительную подготовку: дробление на куски 10...80 мм, сортировку по крупности кусков, обогащение (частичное удаление пустой породы).

Основным видом *топлива* в доменном производстве служит кокс, но в отдельных случаях в дополнение к коксу используют природный газ или пылевидный каменный уголь, которые подают вместе с воздухом, необходимым для горения топлива. *Кокс* — это кусковое, прочное и высокопористое топливо, получаемое нагревом особых сортов коксующихся каменных углей до температуры 1 000...1 200 °C без доступа воздуха в коксовых батареях. Для доменного процесса используются куски кокса размером 25...200 мм и пористостью около 50 %. Кокс должен содержать не менее 80 % углерода и возможно меньшее количество серы (не более 2 %), золы (12 %), влаги (5 %) и летучих веществ (1...2 %).

Пустая порода железных руд содержит оксиды, температура плавления которых выше развиваемой в доменной печи ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 2040 °C,  $\text{SiO}_2$  — 2570 °C,  $\text{MgO}$  — 2 800 °C и др.). Для удаления пустой породы и золы топлива из доменной печи применяют *флюсы*, снижающие температуру плавления пустой породы и ошлаковывающие золу кокса. Различают основные и кислые флюсы. К основным относятся известняк  $\text{CaCO}_3$  и доломит  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ , дающие при разложении оксиды щелочной группы  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$ , к кислым — кремнезем  $\text{SiO}_2$  (кислотный оксид).

При подготовке шихты для выплавки чугуна применяются также обожженные в восстановительной атмосфере *окатыши*, которые содержат частично восстановленные оксиды железа, что по-

звolyет повысить производительность доменных печей. Технологический процесс окатывания состоит из нескольких стадий:

- 1) увлажнение шихты (влажность должна составлять 8...10 %), состоящей из измельченных рудных концентратов, флюса, топлива;
- 2) обработка шихты во вращающихся барабанах (или тарельчатых чашах) для придания ей формы шариков (окатышей) диаметром до 30 мм;
- 3) упрочнение окатышей сушкой при температуре 300...500 °С;
- 4) обжиг при температуре 1 200...1 350 °С.

**Огнеупоры** служат для футеровки рабочего пространства доменных печей. По химическому составу огнеупоры разделяют на *кислые* (динас и кварцит — 93...98 %  $\text{SiO}_2$ , огнеупорность 1680...1 800 °С), *основные* (магнезит — около 93 %  $\text{MgO}$  и 3 %  $\text{CaO}$ , огнеупорность 2 300...2 500 °С; доломит —  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ , огнеупорность 1 750...2 000 °С) и *нейтральные* (шамот — 45...30 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 50...60 %  $\text{SiO}_2$ , огнеупорность 1 600...1 770 °С). Последние наиболее широко применяются для огнеупорной кладки доменных печей.

**Устройство доменной печи. Принцип ее работы.** Чугун выплавляют в доменных печах (рис. 1.1), отличающихся высокой производительностью (5 000 т в сутки и выше). Современная доменная печь — это шахтная печь высотой до 80 м и диаметром 12 м, имеющая полезный (занятый загруженными в печь материалами и продуктами плавки) объем 1 300...3 200 м<sup>3</sup>.

Вертикальное сечение рабочего пространства доменной печи называется ее профилем (рис. 1.1, а). Шихта 1 подается в загрузочное устройство 2. Под загрузочным устройством располагается колошник 3, из которого печные газы по трубам удаляются из печи. Ниже колошника расположена шахта 4 (коническая часть печи), которая расширяется книзу для облегчения опускания материалов и лучшего распределения газов по поперечному сечению печи. Шахта печи футеруется (выкладывается) огнеупорным шамотным кирпичом 5. Толщина кладки превышает 1 м. Ниже шахты следует распар 6 (цилиндрическая часть печи), под которым расположена часть печи в виде усеченного конуса с меньшим нижним основанием, называемая заплечиками 7. Заплечики имеют такую форму из-за сокращения объема шихтовых материалов в результате образования жидких продуктов плавки.

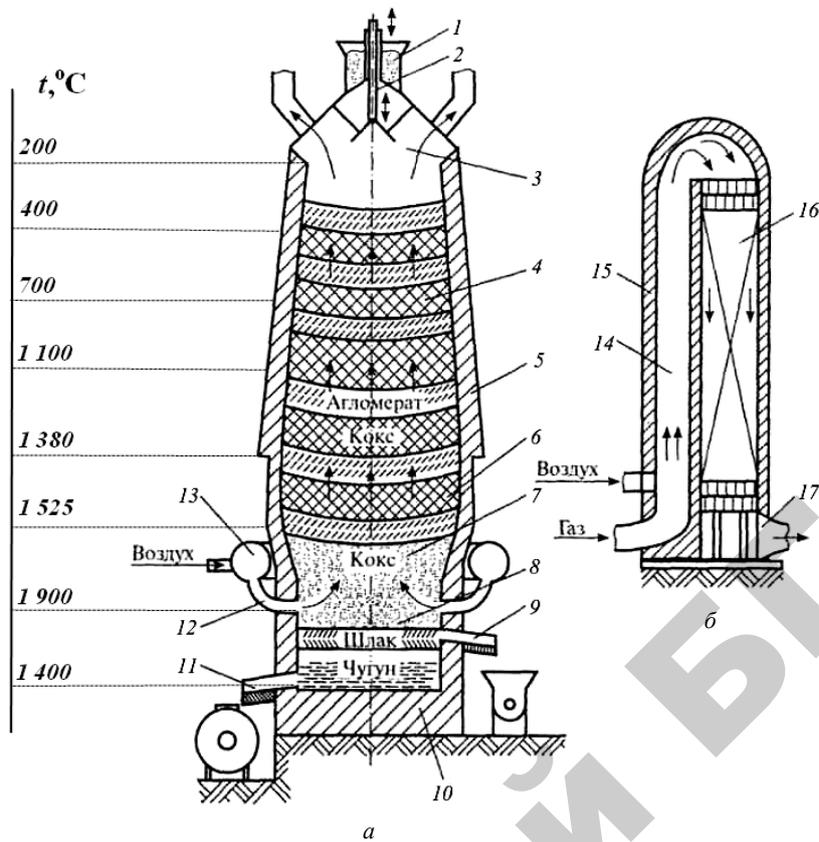


Рис. 1.1. Конструкция доменной печи:  
 а — доменная печь; б — воздухонагреватель

Нижняя цилиндрическая часть доменной печи называется горном 8. Как горн, так и заплечики оборудуются водяным охлаждением. В современных доменных печах шахта также имеет водяное охлаждение. В верхней части горна расположены водоохлаждаемые медные фурмы 12, по которым из фурменного пояса 13 в доменную печь под давлением 300 кПа подается нагретый до температуры 900...1200 °С воздух (расход которого составляет до 5000 м<sup>3</sup>/мин), зачастую обогащенный кислородом. Количество фурм на малых печах составляет восемь, на больших (мощных) — двадцать. В нижней части горна находятся шлаковая 9 и чугу-

ная 11 летки, через которые с интервалом 2...3 ч выпускаются жидкий шлак и чугуны, скапливающиеся на лещади 10.

Каждая доменная печь работает с тремя воздушнонагревателями (рис. 1.1, б). Очищенные доменные (колошниковые) газы, предназначенные для нагрева воздуха, подаваемого в фурмы доменной печи и содержащие около 30 % оксида углерода CO, смешиваются с воздухом и, сгорая в камере 14, футерованной огнеупорным кирпичом 15, при температуре около 1300 °С проходят через насадку 16, выложенную из кирпича, отдавая ей свою теплоту, после чего через газоход 17 удаляются в атмосферу.

Объем доменной печи, занятый плавильными материалами и продуктами плавки, называется *полезным объемом*.

При доменной плавке производится раздельная загрузка через верхнюю часть печи (колошник) окатышей или агломерата и кокса, располагающихся в шахте печи слоями. При нагревании шихты (за счет горения кокса, стимулируемого вдуваемым в горн горячим воздухом) в печи протекают сложные физико-химические процессы, в результате чего шихта постепенно опускается вниз навстречу поднимающимся горячим газам. Взаимодействие компонентов шихты с газами приводит к образованию в нижней части печи (горне) двух несмешивающихся жидких слоев — чугуна и шлака. Непрерывная работа печи рассчитана на 4...8 лет.

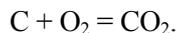
Эффективность работы доменной печи часто оценивается коэффициентом использования ее полезного объема —  $k$  (КИПО), т. е. отношением полезного объема печи  $V$  (м<sup>3</sup>) к суточному выпуску чугуна  $Q$  (т):  $k = V/Q$ . Таким образом, чем меньше КИПО, тем более эффективна работа печи. На некоторых заводах КИПО равен 0,35.

**Сущность доменного процесса.** Доменный процесс заключается в восстановлении оксидов железа, содержащихся в руде, и в ошлаковании пустой породы. Восстановителями являются оксид углерода CO и твердый (сажистый) углерод. Работа доменной печи основана на использовании принципа противотока: вниз постепенно опускаются шихтовые материалы, а навстречу им снизу движется поток горячих газов, образующихся при сгорании топлива.

Изменения, происходящие в потоке опускающихся твердых материалов и поднимающихся газов при их взаимодействии, осуществляются в температурных зонах доменной печи (рис. 1.1, а).

В газах, поднимающихся снизу вверх, наблюдаются следующие процессы: горение топлива, образование восстановителей (оксида углерода CO и сажистого углерода), восстановление оксидов железа.

**Горение топлива.** Реакция происходит в области расположения фурм, где достигаются наиболее высокие температуры (до 1 900 °С):



**Образование восстановителей.**

**Оксид углерода.** Образовавшийся при сгорании кокса углекислый газ восстанавливается углеродом раскаленного кокса (при  $t > 1\,000\text{ °C}$ ) до оксида углерода:



**Сажистый углерод.** Вследствие понижения температуры до 400...550 °С при движении газов снизу вверх происходит выделение твердого сажистого углерода  $\text{C}_{\text{саж}}$ :



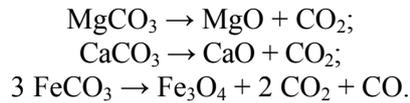
Оксид углерода CO, поднимающийся из горна в верхние зоны доменной печи, является активным восстановителем, способным соединиться не только со свободным кислородом, но и выводить кислород из твердых оксидов железа и других элементов.

Сажистый углерод проникает через поры и трещины внутрь кусков руды, а также оседает на их наружной поверхности и при температуре свыше 1 000 °С восстанавливает оксид железа FeO.

В шихте, опускающейся сверху вниз, протекают следующие процессы: испарение влаги, разложение углекислых солей, удаление летучих веществ, восстановление (косвенное и прямое) оксидов железа, науглераживание железа и образования чугуна, восстановление оксидов Mn, Si, P, удаление серы и фосфора.

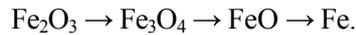
**Испарение влаги.** Полное удаление гигроскопической и химически связанной воды происходит при  $t = 100\text{...}500\text{ °C}$  (а иногда и до 800 °С).

**Разложение углекислых солей** происходит при  $t = 300\text{...}900\text{ °C}$ :



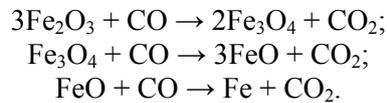
**Удаление летучих веществ** происходит при  $t = 400 \dots 900 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Восстановление оксидов железа.** В доменной печи оксиды железа восстанавливаются оксидом углерода CO (косвенное восстановление) или сажистым углеродом (прямое восстановление). При этом из-за различной прочности связей атомов кислорода высший оксид железа превращается в металлическое железо в следующем порядке:

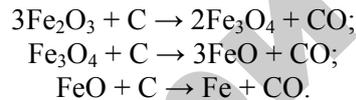


Восстановление оксидов железа происходит в диапазоне температур  $500 \dots 1100 \text{ }^\circ\text{C}$  по двум группам реакций: косвенное и прямое восстановление.

**Косвенное восстановление** происходит при низких температурах в следующей последовательности:

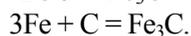
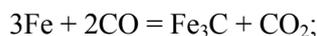


**Прямое восстановление** происходит при высоких температурах в следующей последовательности:



Восстановление оксидов железа при температуре  $900 \dots 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  и выше происходит исключительно прямым путем. При выплавке обычных сортов чугуна от 40 до 60 % железа восстанавливается прямым путем. Наилучшие технико-экономические показатели получаются при оптимальном соотношении прямого и косвенного процессов восстановления.

**Науглероживание железа и образование чугуна** происходит при  $t > 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ :

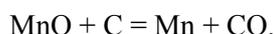


Карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ , растворяясь в металлической массе, понижает точку плавления науглероженного железа, которое переходит в жидкое состояние.

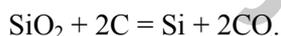
В условиях доменного процесса восстановленное железо растворяет до 3,5...4 %, а в некоторых случаях до 6 % углерода и, следовательно, превращается в чугуны, который плавится и стекает на дно горна.

**Восстановление оксидов Mn, Si, P.** Одновременно с плавлением чугуна в доменной печи происходит взаимодействие оксида углерода  $\text{CO}$  и сажистого углерода с оксидами  $\text{Mn}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{P}$  и другими элементами.

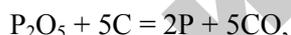
Марганец восстанавливается из оксидов  $\text{MnO}_2$  и  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  до  $\text{MnO}$  оксидом углерода  $\text{CO}$ . Из  $\text{MnO}$  марганец восстанавливается твердым углеродом при температуре более 1 000 °C:



Кремний восстанавливается сажистым углеродом при температуре более 1 450 °C:

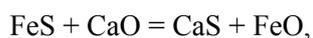


Фосфор восстанавливается сажистым углеродом, т. е.

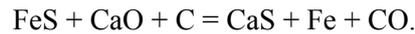


и почти полностью переходит в чугуны.

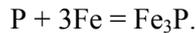
**Удаление серы и фосфора.** Сера попадает в доменную печь, в основном, с коксом и с рудой и известью (частично). Для удаления серы требуются основные шлаки, содержащие в свободном виде  $\text{CaO}$ . Сера находится в металле в виде сернистых соединений  $\text{FeS}$  и  $\text{MnS}$ . Реакция поглощения шлаком серы из  $\text{FeS}$  и  $\text{MnS}$  осуществляется при их взаимодействии с  $\text{CaO}$ :



а также с сажистым углеродом:



Источником фосфора в чугуне являются минералы  $3\text{CaO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5$  и  $3\text{FeO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ , попадающие в доменную печь вместе с рудой. При высокой температуре они восстанавливаются оксидом углерода CO, водородом, а также сажистым углеродом. В свою очередь, фосфор, взаимодействуя с железом, образует фосфид, который переходит в чугун:



Приведенные реакции химических процессов, происходящих в доменной печи, свидетельствуют о том, что доменный процесс по характеру их протекания является восстановительным.

**Продукты доменной плавки.** Продуктами доменной плавки являются литейный чугун, передельный чугун, ферросплавы, шлак и колошниковый газ.

**Литейный чугун** (после его переплавки на машиностроительных предприятиях) используется для производства чугунных отливок, а **передельный чугун** — для передела на сталь.

**Ферросплавы** с большим содержанием кремния, марганца и других элементов используются для добавки в шихту в качестве раскислителей или легирующих присадок при выплавке стали. К доменным ферросплавам относятся: ферросилиций (содержащий 9...13 % Si и более); ферромарганец (70...75 % Mn и более); зеркальный чугун (10...25 % Mn и до 2 % Si).

**Доменные шлаки** используются для получения строительных материалов: цемента, кирпича, пористых и плотных блоков, щебенки и т. п.

**Колошниковый (доменный) газ** содержит до 30 % CO и до 3 % H<sub>2</sub>, является горючим газом и используется в доменном процессе для нагрева воздуха, подаваемого в фурмы доменной печи.

### 1.3. Производство стали

**Сталь** — сплав железа с углеродом, содержание которого не превышает 2,14 %. Кроме того, в ней содержатся постоянные при-

меси (Mn, Si, S, P) и в ряде случаев легирующие элементы (Ni, Cr, V, Mo, W и др.).

**Физико-химические процессы передела чугуна в сталь.** Основными материалами для производства стали является жидкий пердедельный чугун, стальной лом (скрап) и флюс (известняк CaCO<sub>3</sub>).

Химический состав чугуна и стали приведен в таблице 1.1.

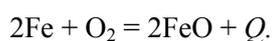
Таблица 1.1  
Содержание углерода и основных примесей в чугуне и стали, %

Материал	C	Si	Mn	P	S
Передельный чугун	4...4,4	0,56...1,26	до 1,75	0,10...0,3	0,03...0,07
Сталь низкоуглеродистая	0,12...0,25	0,12...0,3	0,3...0,9	0,05	0,050

Если сравнить содержание основных примесей в чугуне и стали, можно сделать вывод, что в чугуне содержание углерода, кремния, марганца, серы и фосфора выше, чем в стали. Поэтому основная задача передела чугуна в сталь состоит в удалении части этих примесей с помощью окислительных процессов. Механизм этого окисления не зависит от типа сталеплавильной печи. Наиболее часто для этой цели используют кислородно-конвертерный и мартеновский способы, а также выплавку стали в электропечах.

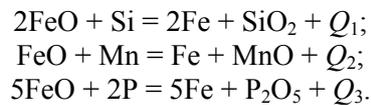
Независимо от способов передела чугуна в сталь и типов печей характер явлений, сопутствующих этому процессу, остается неизменным. Так, при кислородно-конвертерном способе, когда чугун продувается кислородом, в первом приближении можно выделить три периода плавки стали: окислительный, восстановительный и раскислительный.

**Окислительный** период характеризуется взаимодействием вдуваемого кислорода с железом, составляющим основную массу жидкого чугуна, т. е.



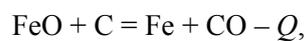
К концу первого периода расплав по химическому составу является сталью, но содержит избыток FeO, что снижает свойства стали. В связи с этим проводят второй (*восстановительный*) период плавки.

В этом периоде образующийся FeO частично переходит в шлак, частично растворяется в металле и окисляет примеси, содержащиеся в чугуне, т. е.



Эти реакции (особенно окисление кремния) идут с выделением большого количества теплоты. Через 2...4 минуты после начала продувки кислородом кремний полностью окисляется.

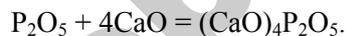
С понижением содержания кремния и марганца и повышением температуры металла возрастает скорость окисления углерода, что происходит за счет взаимодействия с FeO, т. е.



и прямого воздействия газообразного кислорода. Выделяющиеся пузыри CO улучшают перемешивание металла и шлака.

Одновременно с окислением примесей образуется шлак. Общее количество шлака составляет обычно 10...15 % от массы металла. Активный основной шлак способствует более полному удалению из металла вредных примесей — фосфора и серы.

Избыток свободного оксида кальция, образовавшийся при взаимодействии FeO с CaCO<sub>3</sub>, связывает фосфор в прочное соединение (фосфат кальция):

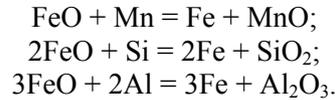


В высокоосновном шлаке сера связывается в сульфид кальция:



После окончания продувки и получения заданного содержания углерода сталь выливают в ковш.

Третий период (*раскисление* стали в ковше) является обязательной завершающей операцией плавки. Окислительный характер плавки приводит к высокой концентрации FeO в металле, вызывающей в стали красноломкость при горячей деформации и ухудшение механических свойств. Раскислением называется процесс восстановления железа из FeO. Раскисление производят марганцем, кремнием и алюминием. При этом осуществляются следующие реакции:



Кремний и марганец вводят в расплав в виде соответствующих ферросплавов, алюминий — в чистом виде. Марганец, кремний и алюминий называют раскислителями стали. В зависимости от степени раскисленности получают кипящие, полуспокойные и спокойные стали.

**Кислородно-конвертерный способ получения стали.** Наиболее прогрессивным способом выплавки стали является кислородно-конвертерный, поскольку он обеспечивает высокий перегрев расплава, а продолжительность цикла не превышает 1 часа.

Конвертер (рис. 1.2) имеет грушевидную форму, стальной кожух 1 которого футеруется изнутри магнезитовым кирпичом 2. Шихта для этого способа состоит из жидкого передельного чугуна, стального и чугуна лома (до 20 %) и флюса — известняка CaCO<sub>3</sub> (до 10 %). Шихта загружается через горловину конвертера, для чего он поворачивается вокруг опорных цапф. При этом твердую составляющую шихты (лом, известняк) загружают на дно конвертера, после чего заливают в него жидкий передельный чугун и поворачивают конвертер в вертикальное положение. Через горловину вводят водоохлаждаемую медную фурму 3 и начинают подачу кислорода. Давление кислорода меняется по ходу плавки и составляет 0,9...1,5 МПа. Расстояние от фурмы до поверхности расплава 5 составляет 0,6...1,4 м в зависимости от характера образующегося шлака и скорости выгорания примесей. Сталь выливается через отверстие 6 в ковш 7 для окончательного раскисления.

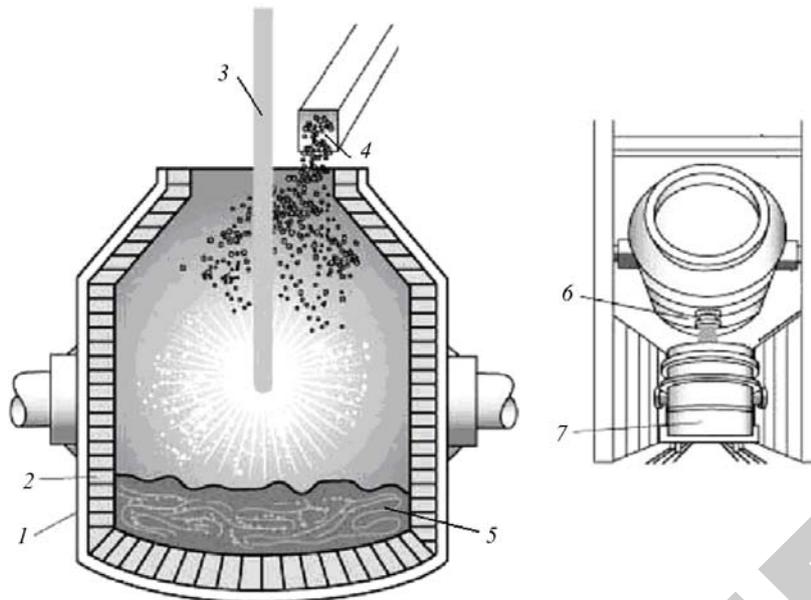


Рис. 1.2. Кислородный конвертер: 1 — стальной кожух; 2 — огнеупорная футеровка; 3 — кислородная фурма; 4 — загрузка флюса; 5 — жидкий чугун; 6 — летка; 7 — ковш

Благодаря высокой температуре стали в конце процесса плавки после раскисления можно вводить ферросплавы, что позволяет получать легированные стали.

Конвертерное производство характеризуется высокой производительностью и не требует топлива, поскольку разогрев происходит за счет экзотермических реакций горения кремния, марганца, углерода и позволяет перерабатывать лом и получать легированные стали. Однако конвертерное производство привязано к доменному цеху, не обеспечивает стабильного состава стали и отличается от других способов выплавки стали высокими потерями металла на угар.

В современных конвертерах за один цикл выплавляется свыше 350 т стали.

**Производство стали в мартеновских печах (мартеновский способ).** Этот способ был назван в честь французского металлурга Пьера Мартена, впервые в 1864 г. осуществившего производ-

ство литой стали на поду. Мартеновская печь используется, в первую очередь, для выплавки качественной стали. Вместимость такой печи может колебаться от 10 т до 900 т.

**Исходные материалы.** Для выплавки стали в мартеновских печах используют, в основном, передельный чугун и стальной скрап. Чугун подается в печь либо в твердом состоянии (чушки массой около 50 кг), или в жидком (из миксера). Стружку и мелкий скрап предварительно прессуют. Раскисление и легирование осуществляют ферросплавами (ферромарганцем и др.).

В качестве топлива для выплавки стали в мартеновских печах применяют мазут или природный газ (в крупных печах в газ часто добавляют мазут), а в качестве флюса — известняк  $\text{CaCO}_3$ .

**Устройство печи.** Мартеновская печь — это пламенная регенеративная печь (рис. 1.3), в которой высокая (до 2 000 °С) температура при плавке достигается не только сжиганием в плавленном пространстве газообразного топлива (или мазута), но и одновременной регенерацией тепла печных газов.

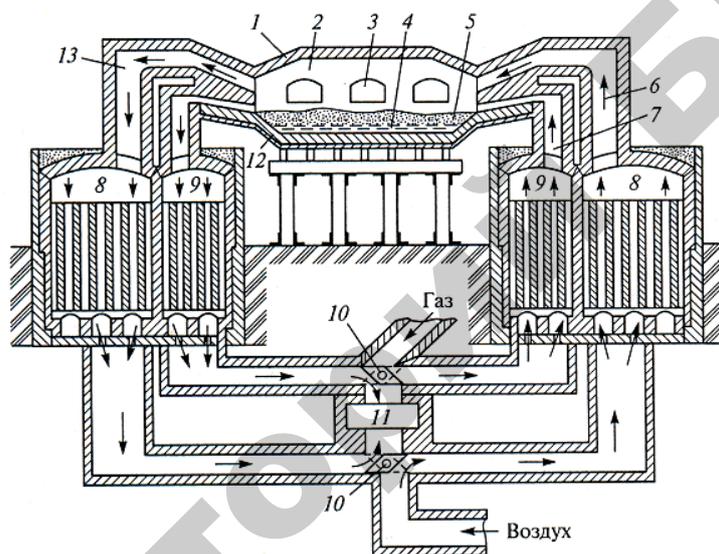


Рис. 1.3. Схема мартеновской печи: 1 — свод печи; 2 — рабочее пространство печи; 3 — завалочные окна; 4 — металл; 5 — шлак; 6, 7 — воздушные и газовые каналы в головках печи; 8, 9 — воздушные и газовые регенераторы; 10 — перекидные устройства; 11 — дымоход; 12 — под печи; 13 — головки печи

В нижней части рабочего пространства печи 2 находится ванна, дном которой является под 12, а боковыми стенками — откосы. «Крышей» рабочего пространства является свод 1. По бокам рабочее пространство ограничено передней и задней стенками, а с торцов к нему примыкают головки 13. В них обычно устанавливают форсунки для подачи мазута и горелки для природного газа. Следует отметить, что в некоторых печах газо-кислородные горелки размещают в своде 1.

Через окна 3, расположенные в передней стенке, производится загрузка в печь исходной шихты и необходимых для получения стали материалов, добавляемых в процессе плавки. Эти окна служат также для забора проб металла и шлака и других операций. В задней стенке (внизу боковой части пода 12) расположено отверстие, через которое производится выпуск готовой плавки.

В регенераторах 8, 9 происходит нагрев воздуха и газообразного топлива, которые по каналам 6, 7 поступают в плавильное пространство печи.

Технологией предусмотрено одновременное протекание двух процессов: подача в печь через одну пару регенераторов нагретых газового топлива и воздуха, и отвод из рабочего пространства печи в другую пару регенераторов продуктов горения, откуда охлажденные продукты горения выпускают в дымовую трубу 11. Направление подачи топлива и выхода печных газов периодически изменяют посредством автоматического переключения перекидных устройств 10 (клапанов).

Эффективность работы мартеновских печей оценивают суточным производством стали, рассчитанным на 1 м<sup>2</sup> площади пода. Эта величина составляет 11...12 т и более.

**Производство стали в электрических печах.** Электropечи используют для выплавки высоколегированных сталей и специальных сплавов. Преимуществами электросталеплавильного процесса являются: быстрый нагрев печи до заданной температуры (~2 000 °С), ее регулирование, возможность создания окислительной, восстановительной атмосферы или вакуума, лучшее раскисление по сравнению с другими способами плавки, более полное удаление серы и фосфора, простота легирования.

Электropечи подразделяют на дуговые и индукционные.

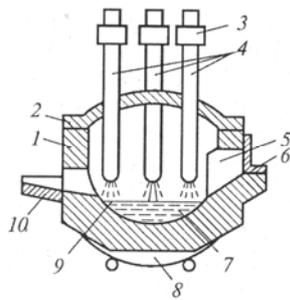


Рис. 1.4. Дуговая печь: 1 — корпус печи; 2 — свод печи; 3 — держатели; 4 — электроды; 5 — окно; 6 — заслонка; 7 — металл; 8 — механизм наклона печи; 9 — шлак; 10 — желоб

Наибольшее распространение получили *дуговые печи* (рис. 1.4). Питание дуговых печей осуществляется переменным трехфазным током. Между тремя вертикально расположенными электродами 4 и металлом 7 возникает дуга. Печи снабжены съемным сводом 2 и рабочим окном 5. Готовая сталь выпускается через отверстие, снабженное сливным желобом 10. Вместимость печей составляет 0,5...400 т.

В дуговых печах осуществляется плавка двух видов: на углеродистой шихте (с окислением примесей) и на шихте из легированных отходов (методом переплава). В последнем случае при выплавке легированных сталей в них дополнительно вводят легирующие элементы в виде ферросплавов.

В *индукционных печах* сталь производится значительно реже, чем в дуговых. Однако в индукционных печах выплавляют наиболее качественные коррозионно-стойкие, жаропрочные и другие стали и сплавы. Они, чаще всего, используются для переплавки отходов легированной стали. Возможность достижения высокой температу-

ры в печи и отсутствие науглероживания металла создает условия для выплавки в индукционных печах стали с малым содержанием углерода. Вместимость индукционных печей составляет до 30 т.

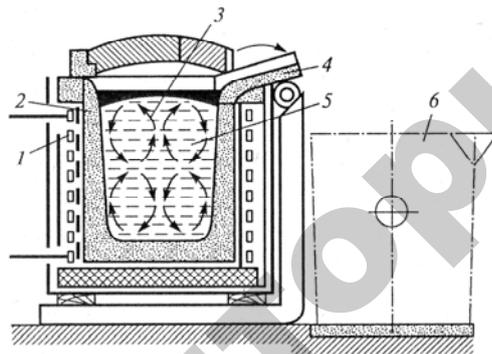


Рис. 1.5. Индукционная печь: 1 — индуктор; 2 — тигель; 3 — вихревые токи; 4 — желоб; 5 — металл; 6 — ковш

В индукционной печи (рис. 1.5) плавка осуществляется в тигле 2, изготовленном из огнеупорных материалов. Тигель окружен спиральным много-

витковым индуктором 1, изготовленным из медной трубки и охлаждаемым циркулирующей водой. Через индуктор пропускается переменный ток.

При работе печи находящийся в тигле металл нагревается и плавится индуктирующимися в нем мощными вихревыми токами 3. Взаимодействие двух электромагнитных полей, возбуждаемых токами, проходящими по индуктору, и вихревыми токами в металле, вызывает интенсивную циркуляцию расплава. Это способствует не только ускорению процесса плавления, но и выравниванию химического состава и температуры расплава в объеме тигля. Различают два основных типа индукционных печей: работающих на токах повышенной (от 0,5 кГц до 1 000 кГц) и промышленной частоты (50 Гц).

#### 1.4. Производство меди

Для производства меди используют медные руды, содержащие 1...6 % Cu, а также отходы меди и ее сплавов. В рудах медь обычно находится в виде сернистых соединений ( $\text{CuFeS}_2$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{CuS}$ ), оксидов ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO}$ ) или гидрокарбонатов [ $\text{CuCO}_3$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ,  $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ]. Кроме рудных минералов в медных рудах содержится пустая порода в виде кремнезема  $\text{SiO}_2$ , глинозема  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , известняка  $\text{CaCO}_3$  и др.

Медь получают, как правило, пирометаллургическим способом (более 85 % производимой меди). Он включает в себя подготовку руды — обогащение и обжиг, плавку руды на штейн, выплавку из штейна черновой меди (конвертирование) и ее очистку от примесей (рафинирование). На рисунке 1.6 приведена упрощенная схема получения меди пирометаллургическим способом.

**Подготовка руды.** Перед плавкой медные руды *обогащают*. Наиболее приемлемым методом их обогащения является флотация, при которой смесь измельченной руды с водой продувают сжатым воздухом. Пузырьки воздуха адсорбируют на своей поверхности несмачиваемые водой частицы руды и поднимают их на поверхность, образуя пену. Пустая порода смачивается водой и в виде шлама оседает на дно. Пену удаляют, сушат и получают из нее *сырой концентрат*. Для уменьшения содержания серы и железа его подвергают окислительному *обжигу* при температуре 750...800 °С и получают *обожженный концентрат*.

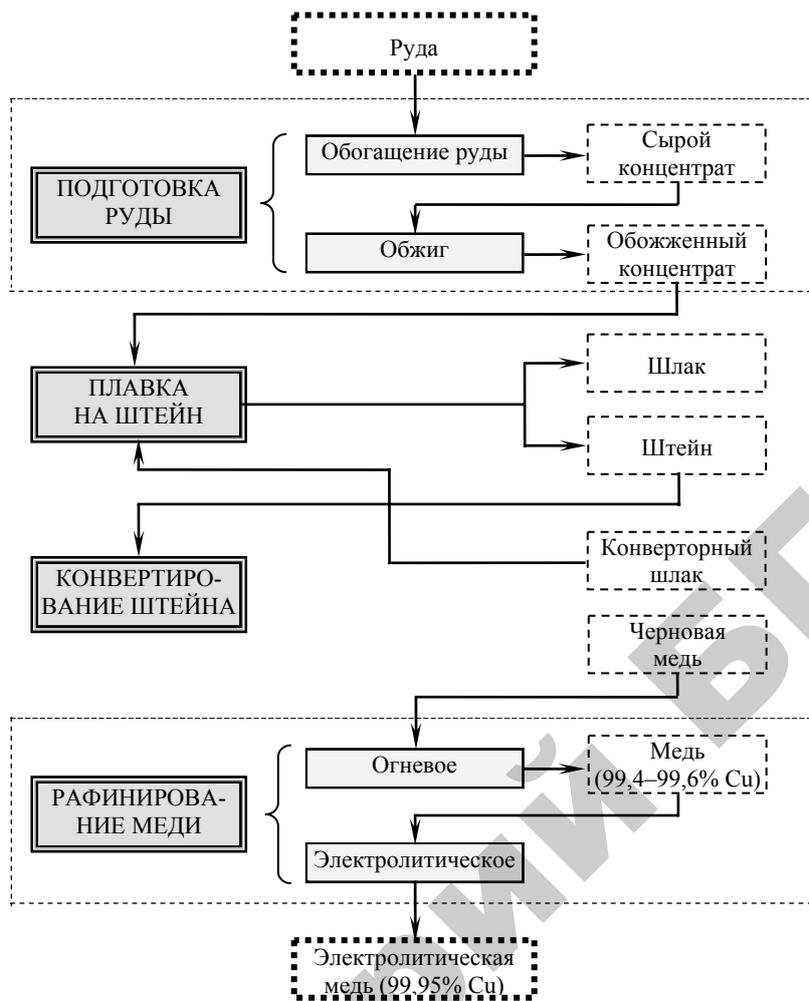


Рис. 1.6. Схема производства меди

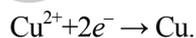
**Плавка на штейн.** Полученный обожженный концентрат переплавляют в отражательных или электрических печах. В результате этого при температуре 1 250...1 300 °С восстанавливаются оксид меди ( $\text{CuO} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O}$ ) и высшие оксиды железа. Образовавшийся оксид меди  $\text{Cu}_2\text{O}$  реагирует с сульфидом железа  $\text{FeS}$  с образовани-

ем сульфида меди  $\text{Cu}_2\text{S}$ .  $\text{Cu}_2\text{S}$  и  $\text{FeS}$  сплавляются и образуют *штейн*, а расплавленные силикаты железа, образовавшиеся при взаимодействии  $\text{FeO}$  и  $\text{SiO}_2$ , растворяют другие оксиды и образуют *шлак*.

**Конвертирование штейна.** Расплавленный медный штейн заливают в конвертеры и продувают воздухом. При этом происходит окисление сульфидов меди и железа и образование *черновой меди*. Черновая медь содержит 98,4...99,4 %  $\text{Cu}$ , 0,1...0,04 %  $\text{Fe}$ , 0,02...0,1 %  $\text{S}$ . Полученный *конвертерный шлак*, содержащий 22...30 %  $\text{SiO}_2$ , 47...70 %  $\text{FeO}$ , около 3%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 1,5...2,5 % меди, повторно используются при плавке меди на штейн.

**Рафинирование меди.** Черновую медь рафинируют для удаления вредных примесей и газов. Первоначально производят *огневое рафинирование* в отражательных печах. Примеси  $\text{S}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Sb}$  и др. окисляются кислородом воздуха, подаваемым по стальным трубкам, погруженным в расплавленную черновую медь. Затем из нее удаляют газы, для чего снимают шлак и погружают в медь сырое дерево. Пары воды способствуют перемешиванию меди и удалению из нее  $\text{SO}_2$  и других газов. При этом медь окисляется, а для освобождения ее от  $\text{Cu}_2\text{O}$  ванну жидкой меди покрывают древесным углем и погружают в нее деревянные жерди. При сухой перегонке древесины, погруженной в медь, образуются углеводороды, которые восстанавливают  $\text{Cu}_2\text{O}$ . После огневого рафинирования получают медь чистотой 99,4...99,6 %. Из нее отливают чушки для выплавки сплавов меди (бронзы и латуни) или плиты для последующего электролитического рафинирования.

*Электролитическое* рафинирование проводят для получения чистой от примесей электролитической меди (99,95 %  $\text{Cu}$ ). Электролитом служит водный раствор  $\text{CuSO}_4$  (10...16 %) и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (10...16 %), аноды изготавливают из меди огневого рафинирования, а катоды — из листов чистой меди. При пропускании через раствор постоянного тока анод растворяется, медь переходит в раствор, а на катодах разряжаются ионы меди:



Примеси (мышьяк, сурьма, висмут и др.) осаждаются на дно ванны. Их удаляют и перерабатывают для извлечения соответст-

вующих металлов. Катоды выгружают, промывают и переплавляют в электропечах для получения электролитической меди.

### 1.5. Производство алюминия

Основным способом производства алюминия в настоящее время является электрометаллургический метод, основанный на электролизе расплавленных сред.

Основным сырьем при производстве алюминия являются алюминиевые руды (бокситы, нефелины, алуниты, каолины). Наибольшее применение имеют бокситы. Алюминий в них содержится в виде минералов — гидроксидов  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{AlO}(\text{OH})$ , корунда  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и каолинита  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Производство алюминия включает в себя: получение глинозема (безводного оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), криолита  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , алюминия-сырца и его рафинирование.

Упрощенная схема технологического процесса производства алюминия приведена на рисунке 1.7.

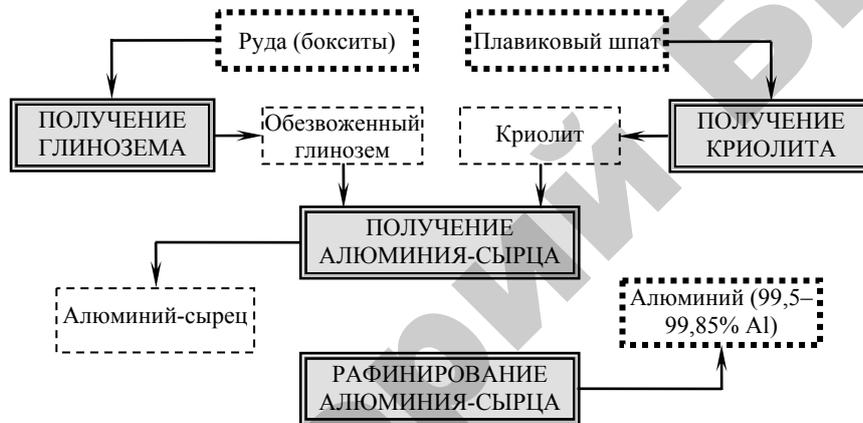
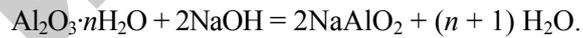
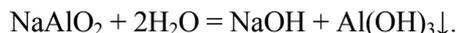


Рис. 1.7. Схема производства алюминия

**Получение глинозема.** Глинозем получают из бокситов путем их обработки щелочью:



Полученный алюминат натрия  $\text{NaAlO}_2$  подвергают гидролизу:



В результате этих процессов в осадок выпадают кристаллы гидроксида алюминия  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Гидроксид алюминия обезвоживают во вращающихся печах при температуре  $1\ 150\text{...}1\ 200\text{ }^\circ\text{C}$  и получают обезвоженный глинозем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

**Получение криолита.** Для производства криолита сначала из плавикового шпата  $\text{CaF}_2$  получают фтористый водород, а затем плавиковую кислоту  $\text{HF}$ . В раствор плавиковой кислоты вводят  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . В результате этого образуется фторалюминиевая кислота  $\text{H}_3\text{AlF}_6$ , которую нейтрализуют содой  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и получают *криолит*  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , выпадающий в осадок, т. е.



Криолит отфильтровывают и просушивают в сушильных барабанах.

**Получение алюминия-сырца.** Алюминий-сырец получают электролизом глинозема в расплавленном криолите. Электролиз проводят в электролизере (рис. 1.8), в котором имеется ванна, футерованная угольными блоками 3 и плитами 4, которые одновременно являются катодами. В ванне находится расплавленный алюминий (толщина его слоя составляет  $250\text{...}300\text{ мм}$ ), который также служит катодом, и жидкий криолит.

Анодное устройство состоит из угольного анода 6, погруженного в электролит 9. Для электролиза и разогрева электролита до температуры  $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$

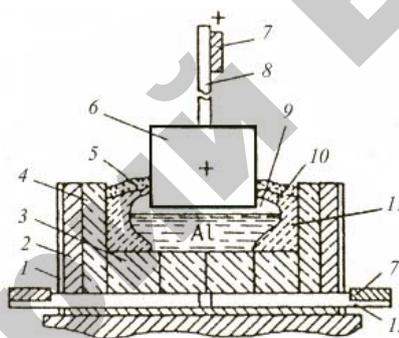
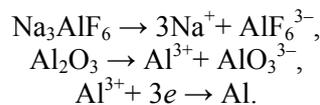


Рис. 1.8. Схема электролизера для получения алюминия: 1 — кожух; 2 — шамот; 3 — угольный блок; 4 — угольная плита; 5 — глинозем; 6 — анод; 7 — токоподводящая шина; 8 — подвеска (токоподвод); 9 — электролит; 10 — корка затвердевшего электролита; 11 — гарнисаж (затвердевший электролит); 12 — токоподвод

с помощью токоподводящих шин 7 подводится постоянный ток силой 70...75 кА и напряжением 4...4,5 В.

Электролит 9 состоит из криолита, глинозема,  $\text{AlF}_3$  и  $\text{NaF}$ . Криолит и глинозем в электролите диссоциируют. В результате этого на катоде разряжаются ионы  $\text{Al}^{3+}$  и образуется алюминий, т. е.



На аноде разряжаются ионы  $\text{O}^{2-}$ , которые окисляют углерод анода, образуя  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ . Последние удаляются из ванны через вентиляционную систему. Алюминий собирается на дне ванны под слоем электролита, откуда его периодически извлекают. Для нормальной работы ванны на ее дне оставляют немного алюминия. Алюминий, полученный электролизом, называют алюминием-сырцом. В нем содержатся металлические и неметаллические примеси, а также газы.

**Рафинирование алюминия-сырца.** Для удаления примесей из алюминия-сырца его подвергают рафинированию. Для этого через расплав алюминия продувают хлор. Образующийся парообразный хлористый алюминий, проходя через расплавленный металл, обволакивает частички примесей, которые всплывают на поверхность металла и затем удаляются. Хлорирование алюминия способствует также удалению  $\text{Na}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$  и газов, растворенных в нем.

Затем жидкий алюминий выдерживают в ковше или электропечи в течение 30...45 мин при температуре 690...730 °С. За этот период времени удаляют всплывающие неметаллические включения и выделяющиеся из металла газы. После рафинирования чистота первичного алюминия составляет 99,5...99,85 %. Алюминий отливают в чушки и направляют потребителям.

### Вопросы для самоконтроля

1. Различие пиро- и гидрометаллургического процессов.
2. Исходные материалы для металлургических процессов.
3. Подготовка шихты при пирометаллургическом способе получения металлов: обогащение руды, агломерация и окатывание.
4. Исходные материалы при производстве чугуна.

5. Конструкция доменной печи.
6. Сущность доменного процесса.
7. Основные продукты доменного производства.
8. Физико-химические процессы при переделе чугуна в сталь.
9. Сущность кислородно-конвертерного способа получения стали.
10. Сущность процесса получения стали в мартеновских печах.
11. Сущность процесса производства стали в электрических печах.
12. Схема пирометаллургического процесса производства меди.
13. Схема электрометаллургического процесса производства алюминия.

## 2. ЛИТЬЕ В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫЕ ФОРМЫ

### 2.1. Сущность литейного производства

Производство литых изделий известно с глубокой древности. В Китае, Индии, Вавилоне, Египте, Греции, Риме отливали предметы вооружения, религиозного культа, искусства, домашнего обихода. В XIII–XV веках Византия, Венеция, Генуя, Флоренция славились литыми изделиями.

В русском государстве в XIV...XV веках отливались бронзовые и чугунные пушки, ядра и колокола. В 1586 г. А. Чохов отлил «Царь-пушку» (рис. 1.9). «Царь-пушка» — чугунная отливка массой около 39 т (диаметр ствола — 890 мм, длина — 4 м, калибр — 887 мм). Для выстрела каменным ядром для пушки необходим был заряд пороха массой 84 кг. Расчетная скорость вылета ядра из ствола составляла 230 м/с, а скорость ядра на расстоянии 1 000 м от пушки — 180 м/с. Позднее в России были созданы и другие замечательные образцы литейного искусства. Так, в 1735 г. был отлит «Царь-колокол» (рис. 1.10) массой свыше 200 т отцом и сыном Моториными, в 1782 г. — памятник Петру I «Медный всадник» (массой 22 т) Э. Фальконе, в 1816 г. — памятник Минину и Пожарскому В. П. Екимовым, в 1850 г. — скульптурные группы Аничкова моста (рис. 1.11) в Петербурге П. К. Клодтом и др. В 1894 г. на заводе в Перми была изготовлена чугунная отливка шабота для кузнечного молота массой 620 т.



Рис. 1.9. Царь-пушка



Рис. 1.10. Царь-колокол



Рис. 1.11. Скульптуры Аничкова моста

**Литейное производство** — отрасль машиностроения, занимающаяся изготовлением фасонных заготовок или деталей путем заливки расплавленного металла в специальную форму, полость которой имеет конфигурацию заготовки или детали. При охлаждении залитый

металл затвердевает и в твердом состоянии сохраняет конфигурацию той полости, в которую он был залит. Конечную продукцию литейного производства (заготовку или деталь) называют *отливкой*.

Общий мировой выпуск отливок в 2011 г. составил 75 млн т. При этом 70 % отливок приходится на машиностроение, где масса литых деталей от их общей массы составляет 50 %. Из литых заготовок в станкостроении изготавливают 80 % всех деталей, в сельскохозяйственном машиностроении и в тракторостроении — до 60 %.

Методом литья изготавливают блоки двигателей, головки цилиндров, поршни и поршневые кольца, коленчатые валы, корпуса и крышки редукторов, зубчатые колеса, станины станков и прокатных станов, турбинные лопатки, гусеничные траки, ковши экскаваторов и другие детали, которые затруднительно или невозможно получить другими методами обработки металлов (в частности, давлением и резанием).

Технология литья позволяет:

1) получать изделия сложной формы и различных размеров (блоки цилиндров ДВС, станины металлорежущих станков, фасонное художественное литье);

2) изготавливать изделия с минимальными припусками на обработку (детали фотоаппаратов, поршни ДВС). При этом коэффициент использования металла (КИМ) составляет не менее 70 %, а при литье под давлением — 95 %;

3) изготавливать изделия из сплавов с низкой пластичностью и низкой обрабатываемостью резанием (ковши экскаваторов, траки и т. д.).

Для изготовления отливок применяют литье в песчаноглинистые формы и специальные способы (литье по выплавляемым моделям, в оболочковые формы, в кокиль, под давлением, центробежное литье и др.).

При выборе способа литья учитывают объем производства, требования к геометрической форме изделия и чистоте поверхности, химический состав заливаемого металла, форму отливки, экономические соображения и другие факторы.

Независимо от способа литья во всех случаях для получения отливки нужна литейная форма. *Литейная форма* представляет собой конструкцию, состоящую из элементов, образующих рабочую

полость, заполнение которой расплавом обеспечивает получение отливки заданных размеров и конфигурации.

При изготовлении отливок литейная форма является основным инструментом. Форма обеспечивает, во-первых, необходимую конфигурацию и размеры отливки, во-вторых, заданную точность и качество ее поверхности, в-третьих, определенную скорость охлаждения залитого металла, способствующую формированию требуемой структуры и соответствующих свойств отливки.

Литейные формы подразделяют по количеству заливок на разовые и многократные, по материалу — па песчаные, песчано-цементные, гипсовые, металлические, из высокоогнеупорных материалов и др.

Основными операциями технологического процесса изготовления отливок являются: изготовление литейной формы, плавка металла и заливка в форму, извлечение отливок из формы.

## 2.2. Литейная оснастка для изготовления песчано-глинистой формы

Первые литейные формы делали из камня и глины, и только в конце XVIII в. их начали изготавливать из специально приготовленной увлажненной смеси песка и глины, так называемые песчано-глинистые формы (ПГФ). В настоящее время около 80 % отливок изготавливают в ПГФ.

Основным видом ПГФ является закрытая литейная форма, в которой отливка со всех сторон ограничена полостью формы. Такая форма пригодна для изготовления только одной отливки. При выемке (выбивке) готовой детали форму разрушают, извлекают деталь, отрезают элементы литниковой системы, очищают поверхность от остатков формовочного материала и направляют на механическую обработку.

Для изготовления ПГФ используется литейная оснастка. *Литейная оснастка* — комплекс приспособлений, используемых для изготовления форм. Совокупность технологической оснастки и приспособлений, необходимых для изготовления полости в ПГФ, называется *модельным комплектом*. В модельный комплект входят: модели отливки и элементов литниковой системы, модельные и сушильные плиты, стержневые ящики, формующие, контрольные

и сборочные шаблоны для конкретной отливки. Существует также понятие «**формовочный комплект**», под которым подразумевается полный комплект оснастки, используемый для получения ПГФ. В него дополнительно входят (наряду с приспособлениями модельного комплекта) необходимые для изготовления форм опоки, дополнительные рамки, штыри, скобы и т. д.

**Литейная модель** — приспособление (рис. 1.12), предназначенное для получения полостей в литейной форме, соответствующих наружной конфигурации отливки.

Модель имеет ряд *отличий* от отливки.

1. Размеры модели делают больше, чем соответствующие размеры отливки с учетом линейной усадки сплава (для углеродистых сталей составляет 2,0...2,5 %, для чугуна — 0,8...1,2 %, для медных сплавов — 1,0...1,5 % и для алюминиевых — 0,9...1,2 %) и припусков на последующую механическую обработку. Припуск зависит от размера отливки и вида сплава. Так, для мелкого чугунного литья припуск составляет 0,7...5 мм на сторону.

2. Модель изготавливают со стержневыми знаками *1*. Знаки на модели образуют в форме дополнительные полости, в которые помещают знаковые части стержня.

3. Вертикальные стенки модели делают с уклонами 0,5...3,0° для того, чтобы при извлечении модели форма не разрушалась.

4. Сопряжения стенок в модели должны быть плавными и без острых углов. Скругление внутренних углов называется галтелью, наружных — закруглением ( $R = 1/5...1/3$  от средней арифметической толщины стенок).

Модели изготавливают из дерева, металла или пластмассы. Выбор материала модели и степень точности ее изготовления зависит от серийности производства. Отливки в единичном производстве, как правило, изготавливают по деревянным моделям, а в серийном и массовом — по металлическим.

**Стержневой ящик** (рис. 1.13) — приспособление, имеющее рабочую полость для получения стержней нужных размеров

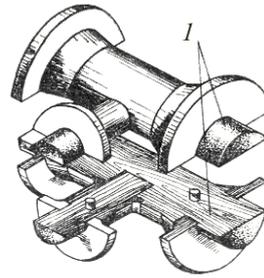


Рис. 1.12. Литейная модель:  
1 — знаки стержня

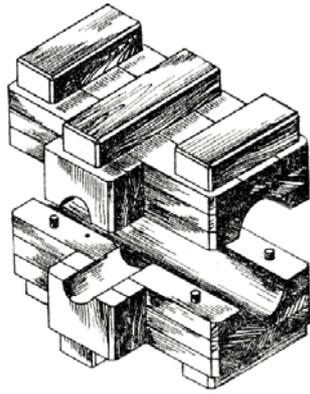


Рис. 1.13. Стержневой ящик



Рис. 1.14. Стержень

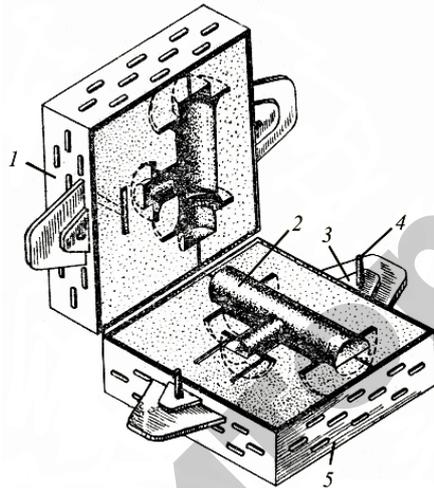


Рис. 1.15. Опоки

и очертаний. **Стержень** — приспособление (рис. 1.14), служащее для формирования отверстий и полостей внутри отливок. Стержневые ящики тоже имеют литейные уклоны. При выборе их размеров учитывают величину усадки сплава и, если требуется, припуски на механическую обработку, а конфигурация предусматривает формирование стержневых знаков. Стержневые ящики делают из тех же материалов, что и модели. По конструкции стержневые ящики могут быть неразъемными (вытряхиваемыми) и разъемными, которые подразделяются на ящики с вертикальными и горизонтальными разъемами.

Изготовление форм по модели производится с помощью специальных рамок, называемых **опоками** (рис. 1.15). Опоки (верхняя 1 и нижняя 5) являются своеобразным остовом формы, предохраняющим ее от разрушения при изготовлении, сборке, транспортировке и заливке. Центровка опок при изготовлении и сборке формы производится при помощи штырей 4, укрепленных в ушках 3. Каждая половина модели заформовывается в отдельной опоке. После извлечения моделей в нижнюю опоку устанавливаются стержни 2, а затем на нее — верхняя

опока. В зависимости от размеров и массы опок они делятся на ручные и крановые. К ручным относят опоки, масса которых вместе с уплотненной формовочной смесью не превышает 50 кг.

**Модельная плита** — плита, оформляющая разъем литейной формы и несущая на себе различные части модели, включая литниковую систему, а также служащая подставкой при набивке одной из парных опок при изготовлении формы.

Литейную форму заливают расплавленным металлом через литниковую систему. **Литниковая система** — совокупность каналов и резервуаров, по которым расплавленный металл поступает из разливочного ковша в полость литейной формы. В модельный комплект входят **модели элементов литниковой системы**.

Основными элементами литниковой системы являются литниковая чаша, стояк, шлакоуловитель, питатели (рис. 1.16).

**Чаша 1** уменьшает размывающее действие струи расплавленного металла и задерживает всплывающий шлак.

**Стояк 2** — вертикальный, круглый сужающийся канал, куда направляется жидкий металл из литниковой чаши.

**Шлакоуловитель 3** — горизонтальный канал трапецевидного сечения, который служит для задержания шлака и соединяет стояк с питателем.

**Питатель 4** — горизонтальные каналы (может быть один или несколько) в нижней полуформе, соединяющие шлакоуловитель с полостью литейной формы.

Для выхода из формы воздуха и всплывающих неметаллических включений на верхних частях формы для средних и крупных отливок делают **выпоры 5** (вертикальные каналы, расширяющиеся кверху).

Для получения отливок без усадочных раковин, которые могут образовываться из-за уменьшения объема металла при его затвердевании, у массивных частей отливки, где усадка проявляется наиболее

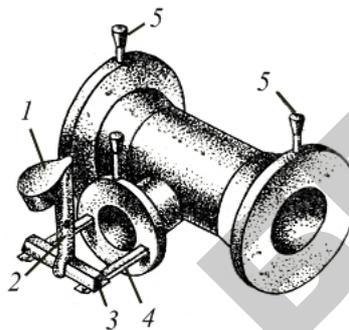


Рис. 1.16. Отливка с элементами литниковой системы: 1 — литниковая чаша; 2 — стояк; 3 — шлакоуловитель; 4 — питатель; 5 — выпоры

активно, предусматривают специальные дополнительные полости, заполняемые жидким металлом в процессе заливки и называемые *прибылями*. Прибыли осуществляют постоянную дополнительную подпитку жидким металлом полость формы. В них металл кристаллизуется в последнюю очередь.

Литниковые системы в зависимости от формы и размеров отливки, состава и свойств литейного сплава имеют различное устройство (металл в полость литейной формы можно подводить сверху, сбоку или снизу). Таким образом, типы литниковых систем могут быть следующими: верхняя, нижняя (сифонная), ярусная (боковая).

Для лучшего задержания шлаковых включений в литниковые чаши дополнительно могут устанавливаться фильтры.

### 2.3. Формовочные и стержневые смеси

Исходными материалами для изготовления форм и стержней являются соответственно формовочные и стержневые смеси. Из **формовочных смесей** изготавливают формы, из **стержневых** — стержни. Смесей приготавливают из материалов, которые состоят из песка, глины и других добавок. Кроме исходных материалов для приготовления смесей широко используют оборотные (бывшие в употреблении) смеси.

**Песок** — основной исходный материал для всех формовочных и стержневых смесей. Наиболее часто применяют кварцевый песок, основой которого является  $\text{SiO}_2$  ( $t_{\text{пл}} = 1713 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Реже в формовочных смесях применяют цирконовый песок —  $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ , ( $t_{\text{пл}} = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ), хромит — хромистый железняк  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$  ( $t_{\text{пл}} = 1850 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и другие материалы. Они превосходят кварцевый песок по термохимической устойчивости и теплопроводности, но более дороги и используются в особо ответственных случаях (например, для получения крупных стальных отливок).

**Глина** — также является основным исходным материалом в песчано-глинистых смесях. Она является связующим веществом, обеспечивающим прочность и пластичность форм или стержней. Глины представляют собой измельченные горные породы, имеющие после увлажнения высокую пластичность. В большинстве формовочных глин основными материалами являются каолинит

$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Кроме каолиновых глин применяют и бентонитовые, которые обладают в 2...3 раза большей связующей способностью. Термостойкость бентонитовых и каолиновых глин равна соответственно 1 300 °С и 1 750 °С.

Для получения отливок высокого качества формовочные и стержневые смеси, из которых делают разовые литейные формы и стержни, должны обладать определенным комплексом механических, технологических и физических свойств.

К **механическим свойствам** формовочных и стержневых смесей относятся прочность, поверхностная прочность, пластичность и податливость.

*Прочность* — способность формы или стержня обеспечивать их сохранность при изготовлении и использовании. Литейные формы (стержни) не должны разрушаться от толчков при сборке и транспортировке, выдерживать давление заливаемого металла. Стандартными характеристиками прочности являются: для сырых смесей — предел прочности при сжатии ( $\sigma_{сж} = 30...70$  кПа), для сухих (после сушки) — предел прочности при растяжении ( $\sigma_{в} = 80...200$  кПа).

*Поверхностная прочность* (осыпаемость) — сопротивление истирающему действию струи металла при его заливке. При недостаточной поверхностной прочности наблюдается осыпаемость, т. е. отделение частиц смеси и попадание их в отливку.

*Пластичность* — способность смеси воспроизводить и сохранять размеры и конфигурацию полости в литейной форме (стержневом ящике).

*Податливость* — способность смеси сокращаться (деформироваться) под воздействием усадки сплава. При недостаточной податливости возникают напряжения, которые могут привести к образованию трещин в отливке.

К **технологическим свойствам** формовочных и стержневых смесей относятся текучесть, термомеханическая устойчивость, негигроскопичность, выбиваемость и долговечность.

*Текучесть* — способность смеси обтекать модель при формовке, заполнять полость стержневого ящика. Перемещение частиц формовочных (стержневых) смесей должно происходить при возможно минимальных усилиях в процессе формовки и обеспечивать одинаковое уплотнение во всех частях формы (стержня) без образования рыхлых мест и пустот.

*Термохимическая устойчивость* или непригораемость — способность смеси выдерживать высокую температуру заливаемого сплава без оплавления или химического взаимодействия.

*Негигроскопичность* — способность смеси после сушки не поглощать влагу из воздуха в течение длительного времени.

*Выбиваемость* — способность легко удаляться из форм и полостей отливок при их выбивке после охлаждения.

*Долговечность* — способность смеси сохранять свои свойства при многократном использовании. Следует отметить, что для изготовления 1 т отливок расходуется 5...6 т формовочной смеси и 1 т стержневой.

К **физическим свойствам** формовочных и стержневых смесей относятся газопроницаемость, а также их теплофизические свойства.

*Газопроницаемость* — способность пропускать через стенки формы (стержня) газы, образующиеся при соприкосновении расплавленного металла с формой (стержнем), а также в процессе кристаллизации отливки. В расплавленном металле всегда содержатся растворенные газы, выделяющиеся при его охлаждении и затвердевании. При недостаточной газопроницаемости формы в отливке и на ее поверхности могут образовываться газовые пузырьки-раковины. Газопроницаемость формовочных смесей характеризуется коэффициентом газопроницаемости  $K$ , определяемом при помощи специального прибора. Для песчано-глинистых смесей  $K = 0...120$  ед.

*Теплофизические свойства* (теплопроводность, теплоемкость) существенно влияют на скорость кристаллизации металла и его последующее охлаждение и, тем самым, на структуру и свойства отливок.

Составы формовочных и стержневых смесей выбирают в зависимости от вида литейного сплава, массы и конфигурации отливок и других условий.

Простые песчано-глинистые смеси (без специальных добавок) обладают рядом недостатков. Связующее вещество (глина) оказывает на некоторые свойства смеси негативное влияние. Для повышения прочности и пластичности в смесях должно быть повышенное содержание глины, но это приводит к уменьшению газопроницаемости и непригораемости, а в сухих формах — к ухудшению податливости и выбиваемости. Поэтому для улучшения свойств песчано-

глинистых смесей в их состав вводят добавки, смачиваемые водой (цемент, жидкое стекло сульфитно-спиртовая барда, патока, декстрин), а также добавки, не смачиваемые водой и не растворяющиеся в ней (масла, смолы, канифоль, лаки, пек).

Для предотвращения пригара и улучшения чистоты поверхности отливок на поверхность форм и стержней наносят тонкий слой противопригарных материалов. Для сырых форм применяют припылы, для сухих — краски. Противопригарные материалы для чугунных отливок — смесь оксида магния, древесного угля и бентонита, для стальных отливок — смесь оксида магния и огнеупорной глины, пылевидный кварц, циркон.

Для повышения податливости и газопроницаемости сухих форм для чугунных отливок в смеси добавляют древесные опилки, при сгорании которых образуются дополнительные поры.

При заливке формы стержни находятся в более тяжелых условиях, испытывая значительное воздействие (термическое и механическое) расплавленного металла. Стержни со всех сторон окружены расплавленным металлом, и отвод из них газов затруднен (на них воздействуют сжимающие усилия усадки сплава). Поэтому по сравнению с формовочными к стержневым смесям предъявляют более высокие требования.

Стержни делят на 5 классов. Для стержней 1-го класса наполнителем является только свежий песок с минимальным содержанием глинистых веществ. В качестве связующих используют, например, раствор растительных масел и канифоли в уайт-спирите с добавками сульфитно-спиртовой барды. Для стержней менее ответственного назначения применяют смесь песка и глины (3...5 %) с добавками сульфатно-спиртовой барды, древесного пека и т. п. Стержни 4 и 5 классов можно изготовить из смесей, содержащих кроме свежего песка 20...60 % оборотной смеси, до 10 % глины и добавки древесного пека. Требуемая прочность обеспечивается сушкой стержней при температуре 100...250 °С.

Кроме того, для упрочнения стержней в стержневой ящик при его изготовлении вкладывают металлический каркас, а для повышения газопроницаемости в стержне выполняют сквозные каналы, выходящие в знаковые части.

Песчано-глинистые смеси по назначению делят на облицовочные, наполнительные и единые.

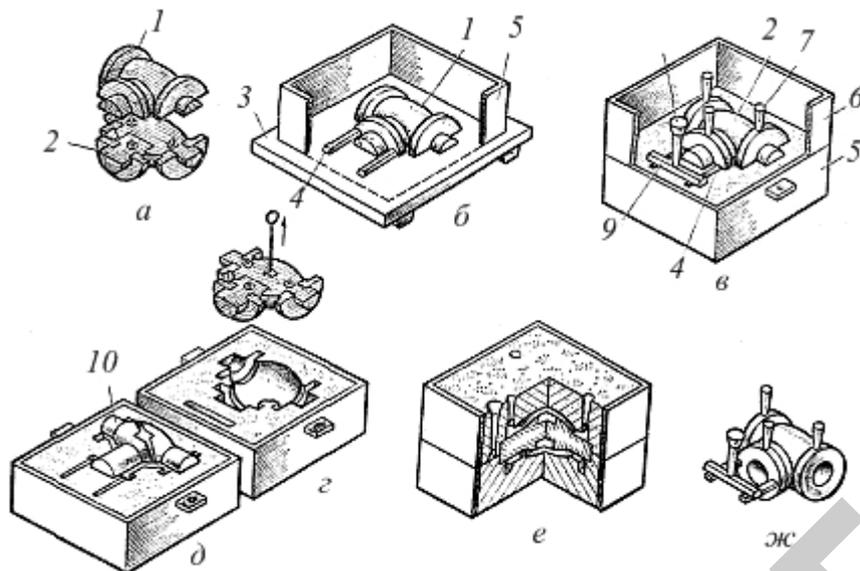
**Облицовочная** смесь — более качественная с высокой прочностью и газопроницаемостью. Для ее приготовления берут большое количество свежих материалов: песка и глины. При изготовлении формы такую смесь наносят на модель, создавая в литейной форме поверхностный слой толщиной 40...100 мм, подвергаемый наибольшему гидродинамическому и термическому воздействию расплава металла при заливке. Остальной объем формы изготавливают из **наполнительной** смеси — менее качественной и в основном состоящей из смеси бывшей в употреблении. **Единые** формовочные смеси применяют в массовом производстве при машинной формовке для заполнения всего объема формы.

#### 2.4. Технология изготовления форм и получения отливок

**Ручная формовка.** Основным способом получения форм в литейном производстве является машинная формовка. Доля ручной формовки в литейном производстве еще составляет 20 %, хотя и непрерывно сокращается.

Ручную формовку применяют для получения отливок (одной или нескольких) в опытном производстве, при изготовлении отливок в ремонтном производстве, а также при изготовлении крупных отливок. При этом используют различные приемы ручной формовки (в парных опоках по разъемной модели, формовка в кессонах и др.).

В настоящее время наибольшее распространение получила формовка в **парных опоках по разъемной модели** (рис. 1.17). Литейную форму (рис. 1.17, *е*), состоящую из двух полуформ, изготавливают по разъемной модели (рис. 1.17, *а*) в следующей последовательности: на модельную плиту 3 устанавливают нижнюю половину модели 1, модели питателей 4 и опоку 5 (рис. 1.17, *б*), в которую засыпают формовочную смесь и уплотняют. Опoку поворачивают на 180° (рис. 1.17, *в*), устанавливают верхнюю половину модели 2, модели шлакоуловителя 9, стояка 8 и выпоров 7. По центрирующим штырям устанавливают верхнюю опоку 6, засыпают формовочную смесь и уплотняют ее. После извлечения модели стояка и выпоров форму раскрывают. Из полуформ извлекают модель отливки (рис. 1.17, *з*) и модели элементов литниковой системы. В нижнюю полуформу устанавливают стержень 10 (рис. 1.17, *д*)



и накрывают нижнюю полуформу верхней. На рисунке 1.17, е показана литейная форма в сборе для изготовления корпуса вентиля. После заливки расплавленного металла и его затвердевания литейную форму разрушают и извлекают отливку (рис. 1.17, ж).

**Изготовление форм в кессонах** производят для крупных отливок массой до 200 т с размерами, превышающими 2,5 м (10...15 м и более). Для таких отливок изготовить формы в опоках невозможно. Эти формы изготавливают в кессонах формовочную вручную. На рисунке 1.18 показана форма станины, собранная в механизированном кессоне, который смонтирован на бетонном основании 7. Дно кессона выложено чугунными плитами 4. Две неподвижные стенки 1 и 8 также облицованы металлическими плитами. Противоположные чугунные стенки 3 и 6 передвигаются с помощью червячного редуктора 2, приводимого в действие электродвигателем, что позволяет изменять внутренние размеры кессона. Форму собирают из стержней-блоков 5, изготовленных из жидких самотвердеющих смесей. Литниковую систему изготавливают из керамических огнеупорных трубок. Верхнюю полуформу 10 устанавливают по центрирующим штырям 9 и прикрепляют к кессону болтами.

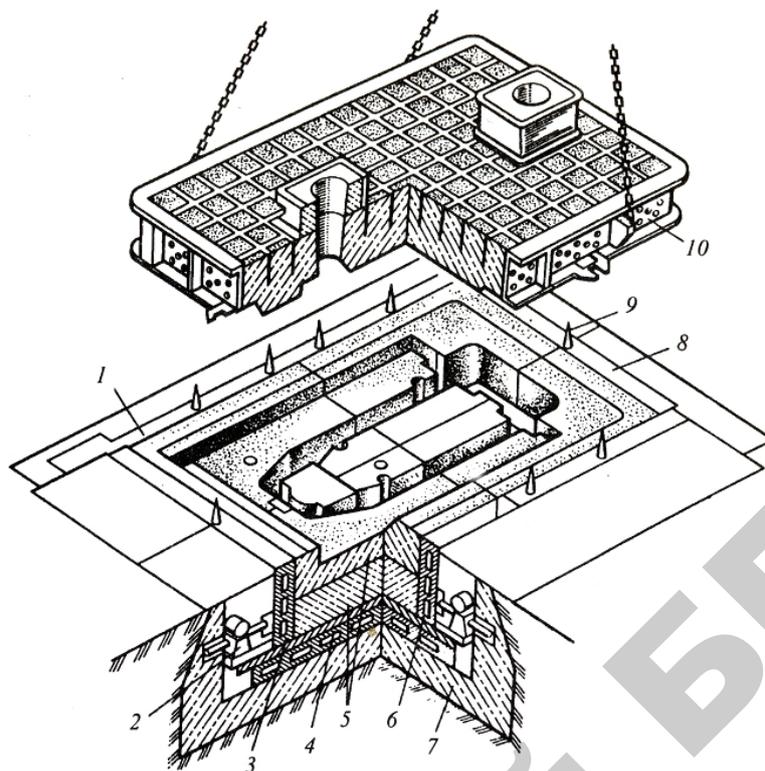


Рис. 1.18. Сборка формы станины в механизированном кессоне

**Машинная формовка** является основным методом изготовления форм в производстве (массовом, крупносерийном и серийном). Машины позволяют механизировать установку опок, засыпку смеси, уплотнение смеси и удаление модели из формы, ее транспортировку и сборку. Машинная формовка по сравнению с ручной повышает производительность уплотнения форм в 15...20 раз. При машинной формовке вручную выполняют только установку стержней и устранение повреждений.

Машинная формовка обладает рядом *преимуществ*. Она обеспечивает:

1) повышение качества отливок, поскольку формовочная смесь уплотняется более равномерно и характеризуется улучшенными

физико-механическими свойствами, т. е. повышается качество отпечатка модели;

2) повышение производительности процесса (на 30...50 %);

3) исключение трудоемких ручных операций;

4) экономию металла (за счет снижения припусков и допусков на последующую механическую обработку).

При машинной формовке формовочную смесь уплотняют прессованием, встряхиванием или с помощью пескомета.

Уплотнение формовочной смеси **прессованием** (рис. 1.19) осуществляют при подаче сжатого воздуха под давлением 0,5...0,8 МПа в нижнюю часть цилиндра 1. В результате этого прессовый поршень 2, стол 3 (с прикрепленной к нему модельной плитой 4) поднимаются. При этом колодка 7, закрепленная на траверсе 8, входит внутрь наполнительной рамки 6 и уплотняет формовочную смесь в опоке 5. Плотность формовочной смеси уменьшается по мере удаления от прессовой колодки из-за трения формовочной смеси о стенки опоки. Неравномерность плотности формовочной смеси тем больше, чем выше опока и модели. Прессование используют для уплотнения формовочной смеси в опоках высотой 200...250 мм.

Для достижения равномерной плотности формовочной смеси в опоке используют многоплунжерные прессовые колодки (рис. 1.20). При прессовании стол 4 машины движется в сторону многоплунжерной прессовой колодки 1. Вследствие различной степени сопротивления формовочной смеси в форме плунжеры 3 под действием давления масла на поршень 2 прессуют находящиеся под ним

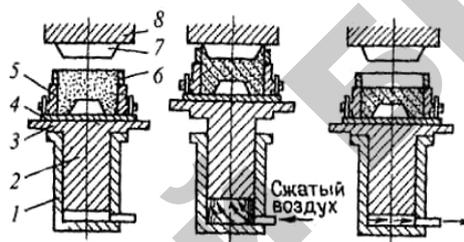


Рис. 1.19. Уплотнение формовочной смеси прессованием

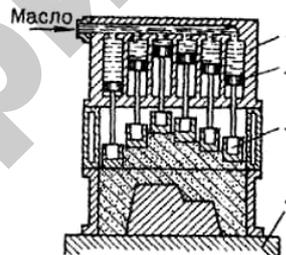


Рис. 1.20. Уплотнение формовочной смеси многоплунжерной прессовой головкой

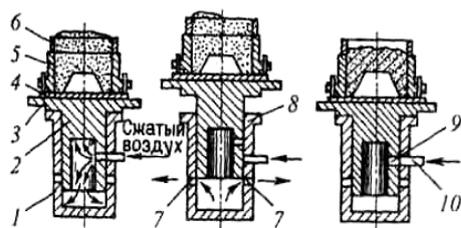


Рис. 1.21. Уплотнение формовочной смеси встряхиванием

поднимается на высоту 25...80 мм. При этом впускное отверстие 10 перекрывается боковой поверхностью поршня, а нижняя его кромка откроет выхлопные окна 7, и воздух выйдет в атмосферу. Тогда давление в пространстве под поршнем снизится, и стол 3 с укрепленной на нем модельной плитой 4 упадет на торец цилиндра 8. Скорость движения стола, а, следовательно, и скорость перемещения модельной плиты понизится до нуля. При этом формовочная смесь в опоке 5 и наполнительной рамке 6, продолжая двигаться вниз по инерции, будет уплотняться. В момент, когда канал 9 встряхивающего поршня окажется против отверстия 10 встряхивающего цилиндра, сжатый воздух снова войдет в полость встряхивающего цилиндра. Это повлечет за собой новый подъем встряхивающего стола и новый удар стола о торец и т. д.

Встряхивающий стол обычно совершает 20...200 ударов в минуту. В результате повторных ударов происходит уплотнение формовочной смеси в опоке. При этом слои формовочной смеси, лежащие у модельной плиты, будут иметь большую плотность, чем слои, лежащие в верхней части формы. Встряхиванием уплотняют смеси в формах высотой до 800 мм. Для уплотнения верхних слоев смеси в форме встряхивание совмещают с прессованием. Это обеспечивает более высокую и равномерную плотность смеси в формах.

Уплотнение формовочной смеси *пескометом* (рис. 1.22) осуществляют рабочим органом пескомета (метательной головкой, выбрасывающей комки смеси на рабочую поверхность модельной плиты). В стальном кожухе 4 метательной головки вращается закрепленный на валу 6 электродвигателя ротор 5 с ковшем 2. Формовочная смесь подается в головку 1 непрерывно ленточным кон-

участки формы независимо от соседних.

Уплотнение формовочной смеси *встряхиванием* (рис. 1.21) осуществляют при подаче сжатого воздуха под давлением 0,5...0,8 МПа в нижнюю часть цилиндра 1. В результате этого встряхивающий поршень 2

вейером 3 через окно в задней стенке кожуха. При вращении ковша (1 000...1 200 об/мин) формовочная смесь собирается в комки 7 и центробежной силой выбрасывается через выходное отверстие в опоку 8. Попадая на модель 9 и модельную плиту 10, смесь за счет кинетической энергии уплотняется равномерно по высоте опоки. Метательную головку равномерно перемещают над опокой.

Пескомет является высокопроизводительной машиной, поэтому его применяют для уплотнения крупных литейных форм. Управление работой пескомета автоматизировано.

**Технологический процесс изготовления отливок** состоит из следующих операций.

1. Проектирование отливок.
2. Приготовление формовочных и стержневых смесей.
3. Изготовление форм и стержней.
4. Сборка форм.
5. Заливка жидкого металла.
6. Охлаждение форм.
7. Выбивка залитых металлом форм из опок и стержней из отливок.
8. Обрубка, очистка и исправление дефектов отливок.
9. Термическая обработка отливок.
10. Испытание материала отливок и контроль их качества.

Исходя из назначения и условий работы литой детали при ее проектировании, необходимо выбрать не только форму и размеры сечений, но и литейный сплав. Ответственной задачей является обеспечение технологичности отливок, определяющей их экономичность. Технологичной при этом считают отливку, которую можно изготовить в данных производственных условиях, применяя экономически наиболее выгодную технологию, с минимальными затратами

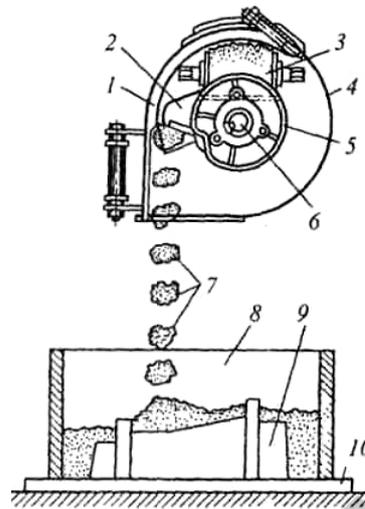


Рис. 1.22. Уплотнение формовочной смеси пескометом

и потерями от брака при высоком качестве изделий. Основное требование технологичности — это простота конфигурации отливки, облегчающая изготовление моделей и форм, выбивку, очистку, последующую обработку детали, а также возможность механизации и автоматизации производства.

При конструировании отливки должны быть соблюдены следующие основные требования: равенство отливки, отсутствие поднутрений и большого скопления металла в отдельных ее частях, наличие формовочных уклонов на вертикальных стенках, плавные переходы при сопряжении стенок, наличие галтелей и закруглений.

В разовых песчано-глинистых формах можно получать отливки весьма сложной конфигурации массой от нескольких граммов до десятков тонн из различных сплавов. Этот способ литья применяется в автомобилестроении и тракторостроении при изготовлении блоков цилиндров, головок блоков цилиндров, ступиц колес, корпусов коробок передач, выпускных и впускных коллекторов двигателей, траков гусеничных машин, корпуса и крышки редукторов, корпуса подшипников и др. (рис. 1.23), в станкостроении при изготовлении станин станков, корпусов коробок подач и скоростей и др.

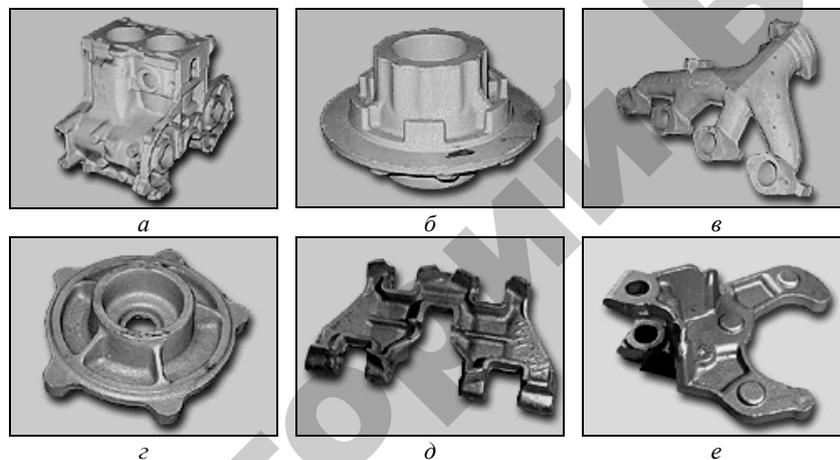


Рис. 1.23. Примеры отливок, полученных при литье в песчано-глинистых формах:  
*a* — блок цилиндров (СЧ 25); *б* — ступица заднего колеса автомобиля (ВЧ 50);  
*в* — коллектор выпускной автомобиля (ВЧ 50); *г* — корпус заднего подшипника (СЧ 21); *д* — звено гусеницы трактора (сталь 110Г13Л);  
*е* — кронштейн передней рессоры (сталь 35Л)

### Вопросы для самоконтроля

1. Определение следующих понятий: литейное производство, отливка, литейная форма.
2. Состав модельного комплекта для изготовления разовой песчано-глинистой формы.
3. Определение литейной модели. Отличия модели от отливки.
4. Определение литниковой системы, ее основные элементы.
5. Формовочные (стержневые) материалы.
6. Формовочные (стержневые) смеси. Классификация формовочных смесей по назначению.
7. Свойства формовочных (стержневых) смесей.
8. Способы ручной и машинной формовок.
9. Технологический процесс получения отливок в разовых песчано-глинистых формах.

### 3. ЛИТЕЙНЫЕ СПЛАВЫ

#### 3.1. Литейные свойства сплавов

Простота изготовления фасонной отливки зависит от литейных свойств сплавов. Например, получить отливку сложной конфигурации и заданных свойств из серого чугуна значительно проще, чем из легированной стали и из некоторых сплавов цветных металлов.

**Литейные свойства сплавов** — это такие технологические свойства, которые непосредственно влияют на получение качественных отливок с хорошими эксплуатационными показателями. Основными литейными свойствами, которые влияют на выбор сплава в качестве литейного материала, являются: жидкотекучесть, усадка, ликвация, склонность к газопоглощению и трещинообразованию.

**Жидкотекучесть** — способность расплава свободно течь в литейной форме, заполняя и точно воспроизводя все ее контуры.

Жидкотекучесть сплавов зависит от следующих параметров:

1. Температурного интервала кристаллизации

$$\Delta T = T_{\text{л}} - T_{\text{с}},$$

где  $T_{\text{л}}$  и  $T_{\text{с}}$  — температуры ликвидуса и солидуса соответственно.

Чем меньше  $\Delta T$ , тем больше жидкотекучесть. Лучшей жидкотекучестью обладают чистые металлы и эвтектические сплавы, у которых  $\Delta T = 0$ . Худшая жидкотекучесть у сплавов, образующих твердые растворы, поскольку в процессе их заливки и охлаждения в литейной форме возникает дополнительное трение образующихся твердых кристаллов о ее стенки.

2. Вязкости и поверхностного натяжения расплава (чем они меньше, тем больше жидкотекучесть).

3. Температуры заливаемого металла и температуры формы (чем они выше, тем выше жидкотекучесть).

4. Свойств литейной формы (чем больше ее теплопроводность, теплоемкость и влажность, тем меньше жидкотекучесть).

Жидкотекучесть литейных сплавов определяют с помощью различных методов и технологических проб. Технологические пробы на жидкотекучесть проводят в специальных литейных формах с полостью в виде каналов, характер заполнения которых жидким ме-

таллом определяет его жидкотекучесть. Из разнообразных конструкций технологических проб наибольшее распространение получила *спираль Керри* — проба спиральной формы (рис. 1.24).

Жидкотекучесть определяют по длине пути, пройденному жидким металлом до его затвердевания, т. е. по длине прутка. Небольшие выступы, нанесенные через 50 мм, облегчают измерение длины спирали (прутка). Спиральный канал позволяет получить длинные прутки в сравнительно небольших формах.

**Усадка** — свойство металлов и сплавов уменьшать свой объем при затвердевании и охлаждении. Она приводит к уменьшению размеров отливки. Различают объемную и линейную усадки.

Объемная  $\epsilon_{об}$  и линейная  $\epsilon_{л}$  усадки определяются, соответственно, по формулам:

$$\epsilon_{об} = \frac{V_{\phi} - V_{отл}}{V_{\phi}}; \quad \epsilon_{л} = \frac{L_{\phi} - L_{отл}}{L_{\phi}},$$

где  $V_{\phi}$  и  $V_{отл}$ ,  $L_{\phi}$  и  $L_{отл}$  — объем и размеры, соответственно, формы и отливки при  $t = 20^{\circ}\text{C}$ .

Объемная и линейная усадки связаны соотношением

$$\epsilon_{об} \approx 3 \epsilon_{л}.$$

На усадку влияют следующие факторы:

1. Химический состав сплава (усадка серого чугуна уменьшается с увеличением содержания углерода С и кремния Si и увеличивается с повышением содержания фосфора Р и серы S; усадка алюминиевых сплавов уменьшается с повышением содержания кремния Si).

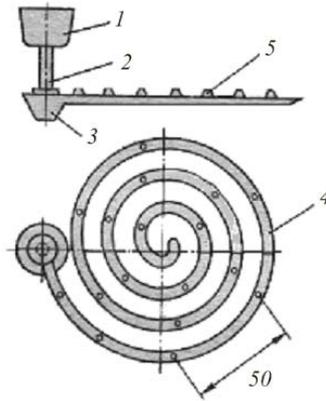


Рис. 1.24. Технологическая спиральная проба (спираль Керри):  
1 — чаша; 2 — стояк;  
3 — металлоприемник; 4 — спиральный канал; 5 — выступы

2. Температура заливаемого металла  $T_{\text{мет}}$  (чем меньше  $T_{\text{мет}}$ , тем меньше усадка).

3. Скорость охлаждения металла в форме или теплопроводность формы (чем больше скорость охлаждения, тем больше усадка).

4. Конструкция отливки и литейной формы (с увеличением толщины стенок чугунной отливки усадка уменьшается).

Линейная усадка для различных сплавов составляет: для серого чугуна — 0,9...1,5 %; для углеродистых сталей — 2...2,4 %; для алюминиевых сплавов — 0,9...1,5 %; для медных сплавов — 1,4...2,3 %.

Усадка в отливках проявляется в виде усадочных раковин и усадочной пористости.

*Усадочные раковины* — сравнительно крупные полости, расположенные в частях отливки, затвердевающих в последнюю очередь. Усадочные раковины образуются при изготовлении отливок из чистых металлов, сплавов эвтектического состава и сплавов с узким интервалом кристаллизации (низкоуглеродистые стали, безоловянистые бронзы и др.). Как правило, усадочные раковины из отливок стремятся сместить в литниковую систему (выпор или прибыль), где металл затвердевает в последнюю очередь.

*Усадочная пористость* — скопление мелких пустот, образовавшихся в обширной зоне отливки в результате усадки в тех местах, которые затвердели последними без доступа к ним расплавленного металла. Усадочная пористость располагается по границам зерен металла.

Для получения отливок без усадочных раковин и пористости необходимо обеспечить, во-первых, непрерывный подвод расплавленного металла в форму в процессе его кристаллизации и, во-вторых, движение фронта кристаллизации таким образом, чтобы последними кристаллизовались части отливки, граничащие с поверхностью формы или расположенные в литниковой системе. Первое достигается размещением в литейной форме прибылей, второе — наружных и внутренних холодильников.

*Ликвация* — неоднородность химического состава отливки в различных ее точках, возникающая при кристаллизации. На процесс развития ликвации (кроме химического состава сплава) влияют технологические факторы (конфигурация отливки, скорость охлаждения и др.). Различают три вида ликвации: зональную, дендритную и ликвацию по плотности.

*Зональная ликвация* наблюдается во всем объеме отливки из-за различия температур кристаллизации отдельных компонентов сплава. По мере кристаллизации металл слитка будет все более обогащаться легкоплавкими примесями, поэтому его химический состав по объему будет различным. Так, наружные участки и тонкие стенки стальных отливок, кристаллизующиеся в первую очередь, содержат ликвирующих более легкоплавких примесей (S, P) меньше, чем более массивные части, которые кристаллизуются позже.

*Дендритная* (внутрикристаллическая) ликвация наблюдается в объеме одного зерна. Чем больше температурный интервал между началом и концом кристаллизации, тем больше будут отличаться по составу отдельные участки внутри зерен. В дендритах оси первого порядка обогащены более тугоплавким компонентом и в них содержание примесей бывает минимальным. Кристаллизующиеся в последнюю очередь междендритные пространства содержат наибольшее количество более легкоплавких компонентов и примесей.

*Ликвация по плотности* наблюдается при сплавлении металлов значительно различающихся по плотности. Так, в сплавах системы «свинец–сурьма» верхняя часть слитка будет обогащена сурьмой, а нижняя — более тяжелым свинцом, т. е. отличаться от среднего состава сплава.

Обычно ликвация является нежелательным явлением, поскольку в результате неоднородности химического состава свойства металла на различных участках отливки будут отличаться друг от друга.

***Склонность к газопоглощению.*** В расплавленном состоянии металлы и сплавы способны активно поглощать водород, кислород, азот и другие газы из оксидов и влаги шихтовых материалов при их плавке, а также сгорании топлива, из окружающей среды при заливке металла в форму и т. д. Как правило, растворимость в металлах газов с понижением температуры уменьшается, что вызывает их выделение в процессе кристаллизации. В результате этого в отливке могут образовываться *газовые раковины* и *газовая пористость*, которые ухудшают механические свойства и герметичность отливок. Для уменьшения газовых раковин и пористости плавку сплава проводят под слоем флюса, в среде защитных газов, с использованием просушенных шихтовых материалов. При этом перед заливкой расплавленный металл подвергают дегазации вакуумированием или продувкой инертными газами.

Для устранения газонасыщенности отливок следует увеличивать газопроницаемость литейных форм и стержней, снижать влажность формовочных смесей, подсушивать формы и т. д. (например, выплавка стали в вакуумных печах устраняет газонасыщенность).

**Склонность к образованию трещин и короблению.** В результате неравномерного затвердевания металла в тонких и толстых частях отливки, а также из-за торможения усадки формой при ее охлаждении возникают внутренние напряжения. Эти напряжения тем выше, чем меньше податливость формы и стержней. Если величина внутренних напряжений превысит предел прочности сплава в данном месте, то в нем образуются горячие или холодные трещины.

*Горячие трещины* — как правило, хорошо видимые разрывы поверхности отливки, распространяющиеся по границам зерен и имеющие неровную окисленную поверхность, на которой при увеличении видно дендритное строение сплава. Эти трещины образуются при застывании расплава в форме. Характерными признаками горячих трещин являются их неровные (рваные) края и значительная ширина.

*Холодные трещины* — очень тонкие разрывы поверхности отливки, имеющие обычно чистую, светлую (с цветами побежалости) зернистую поверхность. Они образуются из-за внутренних напряжений или механического воздействия при температуре ниже температуры свечения отливки. В отличие от горячих трещин холодные распространяются непосредственно по зернам, а не по их границам, и располагаются преимущественно в острых углах и других местах с высокой концентрацией напряжений.

Холодные трещины, чаще всего, образуются в тонкостенных отливках сложной конфигурации. Вероятность их образования тем выше, чем больше упругие свойства сплава, чем значительнее его усадка (особенно при пониженных температурах) и чем ниже теплопроводность сплава. Вероятность образования холодных трещин в отливках также возрастает при наличии в сплаве вредных примесей (например, фосфора в сталях).

Для предупреждения образования трещин необходимо осуществлять равномерное охлаждение отливок (во всех сечениях), применять сплавы, обладающие повышенной пластичностью, проводить дополнительный отжиг отливок и т. п.

Внутренние напряжения, возникающие при охлаждении отливок, могут привести к их короблению (изменению формы и размеров отливок). Вероятность коробления отливки увеличивается при усложнении ее конфигурации и повышении скорости охлаждения, вызывающие неравномерное охлаждение отдельных частей отливки и, как следствие, различную усадку. Коробление отливки также может быть вызвано сопротивлением формы усадке отдельных частей отливки. Для предупреждения коробления отливки необходимо увеличивать податливость формы, создавать рациональную конструкцию отливки и т. д.

### 3.2. Производство отливок из чугуна

При выборе материала для литья детали следует учитывать условия, в которых она работает, физико-механические свойства сплава, литейные свойства, условия кристаллизации в форме, а также стоимость сплава.

Если принять среднюю стоимость отливки из серого чугуна за 100 %, то стоимость отливок из других сплавов составит: ковкий чугун — 130 %, сталь — 160 %, цветные сплавы — 300...600 %.

**Литейные чугуны.** Чугун является самым распространенным сплавом в литейном производстве. Так, около 80 % общего мирового выпуска отливок приходится на долю чугуна. В связи с улучшением его свойств и появлением высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, чугуна с вермикулярным графитом и легированных чугунов специального назначения область применения чугуна продолжает расширяться.

В машиностроении для производства деталей используют следующие чугуны: серые, с вермикулярным графитом, высокопрочные, ковкие и специального назначения, характеризующиеся наличием в их структуре свободного углерода в виде графита. Белые чугуны, в структуре которых углерод находится только в связанном состоянии в виде цементита, в машиностроении применяются редко из-за их высокой твердости, затрудняющей механическую обработку, и хрупкости. Эти чугуны применяются только для ограниченной номенклатуры отливок, подвергающихся в условиях эксплуатации сильному износу от трения при высоких удельных нагрузках (валки прокатных станов, щеки камнедробилок и т. п.).

Широкое применение чугунов обусловлено следующим:

1) высокими литейными свойствами этих сплавов, что позволяет изготавливать из них отливки сложной конфигурации, с тонкими стенками, а также производить механическую обработку этих отливок;

2) большей, чем у стальных деталей, способностью гасить вибрации;

3) меньшим, чем у сталей, влиянием концентраторов напряжений (риски, задиры, переходы от одного сечения к другому) на конструкционную прочность деталей;

4) высокими антифрикционными свойствами, обусловленными наличием в структуре чугуна свободного графита, являющегося естественной смазкой;

5) невысокой стоимостью отливок по сравнению со стоимостью отливок из стали и цветных сплавов.

**Серый чугун** — чугун с пластинчатой формой графитовых включений. Металлической основой серого чугуна является феррит, феррит – перлит или перлит (рис. 1.25). Он является наиболее распространенным литейным сплавом. Отливки из этого чугуна составляют до 80 % от общего объема чугунного литья.

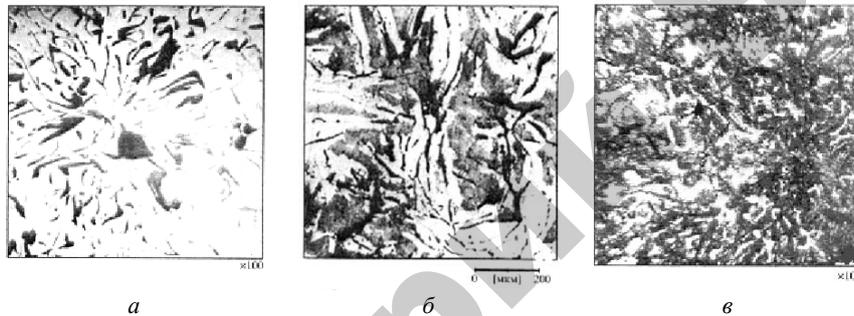


Рис. 1.25. Микроструктура серого чугуна: *а* — ферритный чугун; *б* — феррито-перлитный; *в* — перлитный

Структура металлической основы практически не влияет на низкую пластичность серого чугуна ( $\delta = 0,2...0,5\%$ ), но оказывает влияние на его прочность и твердость ( $\sigma_B = 100...450$  МПа;  $HB = 143...289$ ). Он обычно содержит 2,9...3,7 % С, 0,5...1,1 % Мп, 1,2...2,6 % Si, до 0,3 % Р, до 0,15 % S.

Маркируется серый чугун буквами СЧ (серый чугун) и двумя цифрами, обозначающими предел прочности при растяжении (кгс/мм<sup>2</sup>). Согласно ГОСТ 1412-85 имеются следующие марки серого чугуна: СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35, СЧ40 и СЧ45. Кроме того, по требованию потребителя допускаются марки серого чугуна СЧ18, СЧ21 и СЧ24.

Для изготовления малоответственных деталей, испытывающих небольшие нагрузки в работе, используют чугуны марок СЧ10 и СЧ15, а для изготовления более ответственных деталей применяют чугуны остальных марок.

Следует отметить, что чугуны СЧ30, СЧ35, СЧ40 и СЧ45 относятся к группе *модифицированных серых чугунов*, которые получают добавлением в жидкий чугун перед его разливкой специальных добавок — графитизирующих модификаторов (ферросилиция, силикокальция, графита и др.) в виде кусков размером 1...5 мм. Это позволяет получать в модифицированных чугунных отливках перлитную основу с вкраплениями небольшого количества изолированных пластинок графита средней величины, что повышает их механические свойства.

Высокие литейные свойства серого чугуна позволяют получать самые разнообразные детали. Области применения серых чугунов представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Применение серого чугуна в машиностроении

Марка чугуна	Области применения
СЧ10	Патрубки, пробки, крышки, фланцы
СЧ15	Блоки цилиндров, корпуса насосов, муфты поворота, картеры, ступицы
СЧ18	Зубчатые колеса, звездочки приводных цепей, корпуса редукторов и подшипников, кронштейны, ходовые колеса
СЧ21	Головки цилиндров, гильзы цилиндров, корпус заднего моста, маховики
СЧ28	Зубчатые колеса с фрезерованными или литыми зубьями, звездочки крюковых или роликовых цепей, детали гидромеханизмов (корпус, цилиндр, поршень)
СЧ25, СЧ45	Компрессорные и дизельные цилиндры, блоки автомобильных цилиндров, штампы, коленчатые и кулачковые валы



Рис. 1.26. Микроструктура феррито-перлитного чугуна с вермикулярной формой включений графита

Маркируют чугун с вермикулярной формой включений графита буквами ЧВГ и цифрами, обозначающие предел прочности при растяжении (кгс/мм<sup>2</sup>). Различают следующие марки чугуна с вермикулярным графитом: ЧВГ30, ЧВГ35, ЧВГ40, ЧВГ45 (ГОСТ 28394-89).

Отливки из чугунов с вермикулярным графитом марок ЧВГ30, ЧВГ35 и ЧВГ40 применяют для деталей общего машиностроения, работающих при повышенных циклических механических нагрузках, а также для деталей двигателей внутреннего сгорания, работающих при повышенных температурах и переменных нагрузках. Отливки из чугуна ЧВГ45 применяются для изготовления деталей, работающих при значительных механических нагрузках в условиях трения, износа, кавитации при повышенных термоциклических нагрузках.

Области применения чугунов с вермикулярной формой включений графита представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Применение чугунов с вермикулярной формой включений графита

Марка чугуна	Области применения
ЧВГ30, ЧВГ35, ЧВГ40	Базовые детали станков, корпусные детали, маслопроводы для тракторов, опорные детали головок цилиндров, шестерни автомобилей повышенной грузоподъемности, тормозные рычаги тракторов
ЧВГ45	Корпуса винтовых передач, поршни и гильзы ДВС, эксцентрикые зубчатые колеса и др.

**Высокопрочный чугун** — чугун с шаровидной формой включений графита (рис. 1.27). Этот чугун имеет значительно более высокие прочность и пластичность, чем серый чугун ( $\sigma_b = 350 \dots 1\,000$  МПа;  $\delta = 2 \dots 22$  %;  $HB = 140 \dots 360$ ). Свойства чугуна, в основном, определяются его металлической основой (перлит, перлит – феррит или феррит) и могут быть значительно улучшены термической обработкой. У некоторых марок этого чугуна  $\sigma_b = 800 \dots 1\,200$  МПа.

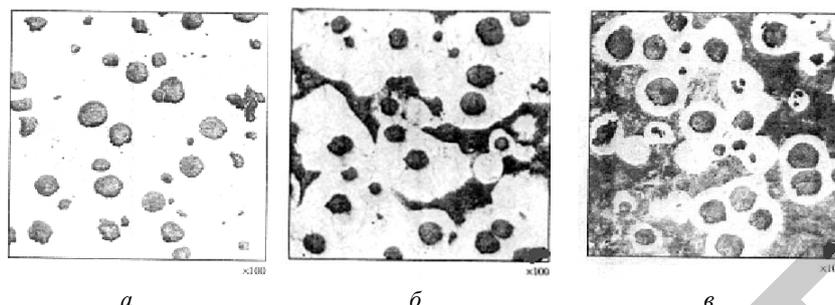


Рис. 1.27. Микроструктура высокопрочного чугуна: *а* — ферритный чугун; *б* — феррито-перлитный; *в* — перлитный

Получение шаровидного графита в чугуне достигается обработкой расплава модификаторами, содержащими Mg, Ce, Y, Nd и др. Для уменьшения пироэффекта при введении в чугун магния добавляют лигатуры с Cu, Ni, Ca, Si и ограниченным содержанием Mg (не более 12...15 %). Один из наиболее рациональных способов получения шаровидного графита в чугуне — его модифицирование в специальных автоклавах с давлением до 600...800 кПа. Модификатор (например, 0,2...0,4 % Mg от массы чугуна) помещают в контейнер с отверстиями и вводят в жидкий металл. Магний расплавляется, испаряется ( $T_{\text{кип}} = 1\,100$  °С), его пары проходят через чугун, частично выделяясь и сгорая на его поверхности. Чугуном «усваивается» до 0,05 % Mg.

Маркируют высокопрочный чугун буквами ВЧ и цифрами, обозначающими предел прочности при растяжении ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ). Различают следующие марки высокопрочного чугуна: ВЧ38, ВЧ42, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100, ВЧ120 (ГОСТ 7293-85).

Высокопрочный чугун применяется в авиации и дизелестроении (коленчатые валы, крышки цилиндров, поршневые кольца, коромысла клапанов, распределительные валы, картеры коробок передач,

ступицы колес, тормозные барабаны, башмаки рессор, зубчатые колеса и др.), в тяжелом машиностроении (для многих деталей прокатных станов — прокатные валки массой до 12 т), в кузнечно-прессовом оборудовании (траверсы прессов, шаботы ковочных молотов), в турбостроении (корпуса паровых турбин), в химической и нефтяной промышленности (корпуса насосов, вентилях и т. д.).

Некоторые области применения высокопрочных чугунов в сельскохозяйственном машиностроении представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4

Применение высокопрочных чугунов в сельскохозяйственном машиностроении

Марка чугуна	Области применения
ВЧ35, ВЧ40	Ступицы, ободы, шестерни и кронштейны сеялок, корпуса дифференциалов, бортовые редукторы, педали сцепления, шкивы, ступицы, корпуса подшипников, опоры и рычаги рулевого управления зерноуборочных комбайнов
ВЧ45	Корпуса редукторов зерноуборочных комбайнов
ВЧ50	Тормозные колодки, корпуса подшипников и муфт сцепления ходовой части зерноуборочных комбайнов
ВЧ60	Лапки свеклоуборочных комбайнов, стаканы подшипников
ВЧ70	Коленчатые валы зерноуборочных комбайнов

*Ковкий чугун* — чугун с хлопьевидной формой графитных включений (рис. 1.28), получаемый продолжительным отжигом (томлением) белого чугуна.

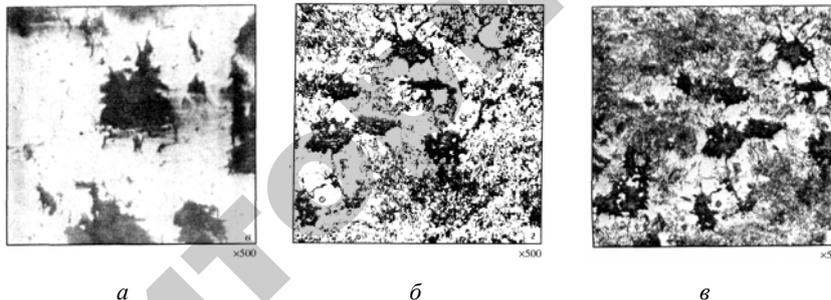


Рис. 1.28. Микроструктура ковкого чугуна: *a* — ферритный чугун; *б* — феррито-перлитный; *в* — перлитный

Технологический процесс получения отливок из ковкого чугуна состоит из двух этапов: 1) получение отливки необходимой конфигурации из белого чугуна; 2) последующий отжиг, формирующий желаемую структуру и свойства металла основы. Двухступенчатый отжиг отливок производят в нейтральной среде (в ящиках с песком). На первой ступени при  $t = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходит графитизация цементита, входящего в ледебурит, на второй (при  $t = 700\text{...}740\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) — графитизация вторичного цементита, входящего в перлит ( $\text{FeC} = 2\text{Fe} + \text{C}$ ).

Маркируют ковкий чугун буквами КЧ и цифрами: первые две цифры — предел прочности при растяжении ( $\text{кгс}/\text{мм}^2$ ); вторые — относительное удлинение при растяжении (%). Различают следующие марки ковкого чугуна: КЧ30-6, КЧ33-8, КЧ35-10, КЧ37-12, КЧ50-4, КЧ56-4, КЧ60-3, КЧ63-2 (ГОСТ 1215-79).

Одна из основных особенностей получения ковкого чугуна состоит в том, что исходный материал (белый чугун, содержащий 2,2...3,2% С, 0,7...1,4% Si, 1% Mn, до 0,2% P, до 0,2% S) имеет низкие литейные свойства, т. е. пониженную жидкотекучесть и значительно большую усадку, чем у серого чугуна. Вторая особенность состоит в том, что полученная отливка из белого чугуна может иметь сравнительно небольшую толщину. В этой связи ковкий чугун применяют для получения отливок с толщиной стенки до 40 мм и массой до 250 кг.

Области применения ковкого чугуна представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5

Области применения ковкого чугуна

Марка чугуна	Области применения
КЧ30-6	Головки, хомутики, гайки, глушители, клапаны, ниппели, тройники, фланцы, муфты и т. д.
КЧ33-8	Башмаки, подкладки, вилки, подшипники, хомутики, кронштейны, коробки, скобы, коромысла и т. д.
КЧ35-10 КЧ37-12	Картеры редукторов, задние мосты, пальцы, ступицы, крючки, хомутики, скобы и т. д.
КЧ45-6, КЧ50-4, КЧ56-4, КЧ60-3, КЧ63-2	Муфты, звездочки в звеньях приводных цепей, буксы, тормозные колодки, рычаги, кронштейны, храповики, коленчатые валы, вилки карданных валов, втулки, лопасти центробежных насосов и дробебетных барабанов, звенья и ролики цепей конвейеров и т. д.

Механические свойства ковкого чугуна зависят, главным образом, от его металлической основы. Перлитные чугуны КЧ45-7 и др. имеют более высокую прочность, но пониженную пластичность. Ферритные ковкие чугуны (например, КЧ37-12), имея меньшую прочность, обладают более высокой пластичностью. В ферритном ковком чугуне при уменьшении размеров и большей степени сфероидизации хлопьевидного графита одновременно повышается и прочность, и пластичность, что не наблюдается в других чугунах.

**Чугуны специального назначения** подразделяют на антифрикционные и легированные чугуны для отливок со специальными свойствами.

*Антифрикционный чугун* (ГОСТ 1585-85) предназначен для отливок, работающих в узлах трения со смазкой.

Различают следующие марки антифрикционного чугуна: АЧС-1, АЧС-2, АЧС-3, АЧС-4, АЧС-5, АЧС-6, АЧВ-1, АЧВ-2, АЧК-1, АЧК-2 (ГОСТ 1585-85). В обозначении марки чугуна буквы означают: АЧ — антифрикционный чугун, С — серый с пластинчатым графитом; В — высокопрочный с шаровидным графитом; К — ковкий с хлопьевидным графитом; цифра — порядковый номер марки.

В зависимости от формы включения графита и металлической основы антифрикционный чугун подразделяется на следующие группы: ковкие антифрикционные ферритно-перлитные чугуны (АЧК-1 и АЧК-2); серые антифрикционные перлитные (АЧС-1 и АЧС-2), перлитно-ферритные (АЧС-3 и АЧС-4) и ферритные (АЧС-5 и АЧС-6) чугуны; высокопрочные антифрикционные перлитный (АЧВ-1) и ферритно-перлитный (АЧВ-2) чугуны.

По сравнению с баббитами и антифрикционными бронзами антифрикционные чугуны имеют низкую стоимость и плохую прирабатываемость, что требует точного сопряжения трущихся поверхностей. Из таких чугунов изготавливают тормозные барабаны автомобилей, диски сцепления и др.

*Легированные чугуны для отливок со специальными свойствами* (ГОСТ 7769-82) подразделяют на жаростойкие, коррозионно-стойкие, износостойкие, жаропрочные и маломаннитные чугуны, которые обладают соответственно повышенной жаростойкостью, коррозионной стойкостью, износостойкостью, жаропрочностью и низкими магнитными свойствами.

Легированные чугуны со специальными свойствами (в зависимости от преобладающего в составе чугуна легирующего элемента) подразделяются на хромистые, кремнистые, алюминиевые, марганцевые и никелевые, а по суммарному количеству легирующих элементов — на низколегированные и высоколегированные.

В обозначении марок чугуна буквы означают: Ч — чугун, а также легирующие элементы (Х — хром, С — кремний, Г — марганец, Н — никель, Д — медь, М — молибден, Т — титан, П — фосфор, Ю — алюминий). Цифры, стоящие после буквы, означают примерную массовую долю основных легирующих элементов. Буква Ш в конце марки указывает, что графит в чугуне имеет шаровидную форму.

Области применения некоторых легированных чугунов для отливок со специальными свойствами представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6

Применение легированных чугунов в отливках со специальными свойствами

Марка чугуна	Области применения
ЧГ8ДЗ, ЧНХТ	Маслоты поршневых компрессионных и масло-съемных колец, седла и направляющие втулки клапанов дизелей и газомотокомпрессоров
ЧНХМД, ЧНХМДШ	Блоки и головки цилиндров, выхлопные патрубки двигателей внутреннего сгорания
ЧН2Х, ЧН3ХМДШ	Различные типы зубчатых колес, цилиндры двигателей, абразивные диски, дроссели
ЧНМШ	Крышки и днища цилиндров дизелей, головки поршней, маслоты поршневых колец
ЧН15Д3Ш, ЧН15Д7	Вставки гильз цилиндров, головки поршней, седла и направляющие втулки клапанов, выхлопные коллекторы двигателей внутреннего сгорания
ЧН19Х3Ш, ЧН11Г7Ш	Головки поршней, корпуса насосов, вентили
ЧН20Д2Ш	Детали топливной арматуры

#### Исходные материалы и оборудование для плавки чугуна.

В литейном производстве для плавки чугуна используют различные типы печей (вагранка, пламенная печь, конвертер или электропечь). При этом более 90 % чугуна выплавляют в *вагранках* — шахтных

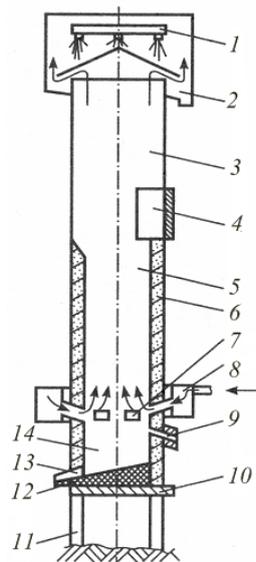


Рис. 1.29. Схема вагранки

печах, по устройству похожих на домну, но значительно меньших размеров и с простой схемой обслуживающего устройства.

Вагранки, работающие по принципу противотока. На рисунке 1.29 приведена схема вагранки. Цилиндрический кожух печи 3 опирается на подовую плиту 10 и колонны 11. Внутри вагранка футеруется шамотным кирпичом 6 до уровня загрузочного окна 4, через которое в вагранку загружается топливо (литейный кокс), металлическая составляющая (чушковый литейный чугун, лом, отходы производства и ферросплавы) и флюсы (известняк  $\text{CaCO}_3$ ). Расход кокса достигает 20 %, а известняка — 3 %. Воздух, необходимый для горения кокса, поступает под давлением  $(0,5...1) \cdot 10^4$  Па через фурменный пояс 8 и фурмы 7. Расплавленный чугун собирается на лещади 12 и периодически выпускается через металлическую летку 13. Шлак сливают через шлаковую летку 9. Пространство между лещадью и фурмами называют горном 14, а от горна до загрузочного окна — шахтой 5. Над шахтой располагается труба, по которой газы вместе с пылью попадают в искрогаситель 2, где они омываются водой через форсунки 1 для смачивания и осаждения пыли.

Перед началом плавки горн и шахта загружаются коксом на высоту около 1 м над уровнем фурм. Кокс поджигают и сверху забрасывают слоями шихту (кокс, металлическую составляющую и известняк).

Высота вагранки до загрузочного окна составляет 3...10 м, внутренний диаметр — 0,7...2,5 м, производительность — до 30 т в сутки.

Вагранки имеют высокий КПД (до 46 %) и обеспечивают низкую стоимость чугуна. Основным недостатком этих печей является нестабильность состава и температуры, что особенно заметно при неритмичном отборе металла.

В настоящее время плавка чугуна в вагранках значительно усовершенствована: используют вагранки с шахтами конусного профиля, водоохлаждаемую плавильную зону без футеровки, разделе-

ние чугуна и шлака при помощи специальных сифонов, вместо холодного дутья применяют горячее дутье с обогащением воздуха кислородом. Все это интенсифицирует процесс плавки, повышает производительность вагранок до 80...100 т в час, снижает расход дефицитного кокса, повышает качество отливок (благодаря получению более «горячего» чугуна).

**Плавка чугуна в электропечах** (индукторных и дуговых) приобретает все большее значение в связи с необходимостью получения модифицированных, высокопрочных и других качественных чугунов. Наиболее совершенными являются индукционные печи (тигельные), обеспечивающие получение точного химического состава сплава, его рафинирование и высокий нагрев.

Все большее развитие получает *дуплет-процесс*, при котором чугун плавят в вагранке, а его доводку, рафинирование и перегрев — в индукционной печи. Такой способ позволяет получать чугун высокого качества при снижении расхода электроэнергии.

**Особенности литейных форм.** Для серого и высокопрочных чугунов при выборе материала формы учитывают температуру сплава при его заливке, которая для серого чугуна обычно составляет 1 200...1 400 °С, а в случае разлива с перегревом — 1 450...1 500 °С. При выборе литниковой системы учитывают хорошую жидкотекучесть и малую усадку чугуна. Для простых отливок нередко делают литник с одним питателем. В большинстве случаев чугун подводят в тонкие сечения отливок. В случае изготовления больших отливок и отливок сложной формы применяют литниковые системы с несколькими питателями для равномерного заполнения всех частей формы. Из-за малой усадки прибыли устанавливают только для крупных отливок или для их массивных частей.

Белый чугун имеет пониженную жидкотекучесть и перед заливкой его нагревают до температуры 1 450...1 500 °С. Поэтому формовочные смеси должны иметь повышенную непригораемость. Из-за большой усадки этого чугуна формовочные смеси должны иметь повышенную податливость. В этом случае формы имеют большие прибыли.

Небольшие формы заливают из ручных ковшей, вмещающих 15...50 кг расплава. Для заливки более крупных форм используют механизированные ковши барабанного типа, которые вмещают до 50 т расплава. В таких ковшах меньше вероятность выплеска из

них чугуна и он охлаждается медленнее, чем в ковшах с открытой поверхностью. Для предупреждения попадания шлака в таких ковшах устанавливают шлакозадерживающие перегородки.

### 3.3. Производство отливок из стали

**Литейные стали.** Стальные литые детали применяются во всех отраслях техники. В некоторых отраслях машиностроения стальное литье составляет 40...60 % от всей массы машины (например, тепловозы). Литьем изготавливают станины и валки прокатных станов, цилиндры, тормозные шкивы, муфты, зубчатые колеса и т. д. Легированные стали используют в энергетическом машиностроении, химической и нефтеперерабатывающей промышленности, металлургии и др. Из этих сталей изготавливают турбинные лопатки, клапаны гидропрессов, арматуру химической и нефтегазовой промышленности, зубья ковшей экскаваторов и другие отливки. Стальные отливки могут иметь массу от нескольких граммов до нескольких десятков тонн и толщину стенок от 1 до 300 мм.

В обозначении марок литейных сталей первые цифры указывают среднюю массовую долю углерода в сотых долях процента, а буквы, следующие за цифрами (кроме Л — литейная), означают легирующие элементы: А — азот, Б — ниобий, В — вольфрам, Г — марганец, Д — медь, М — молибден, Н — никель, Р — бор, С — кремний, Т — титан, Ф — ванадий, Х — хром, Ю — алюминий. Цифры, стоящие после букв, указывают примерную массовую долю легирующего элемента в процентах.

В настоящее время стальные отливки (ГОСТ 977-88) производят из следующих сталей:

1) конструкционных нелегированных — 15Л, 20Л, 25Л, 30Л, 35Л, 40Л, 45Л, 50Л;

2) конструкционных легированных (29 марок) — 20ГЛ, 35ГЛ, 30ГСЛ, 30ХГСФЛ, 45ФЛ, 40ХЛ, 20ХМЛ, 20ХМФЛ, 35ХМЛ, 30ХНМЛ, 35ХГСЛ, 35НГМЛ, 20ДХЛ, 12Х7Г3СЛ и др.;

3) легированных со специальными свойствами: коррозионно-стойкие (18 марок) — 20Х13Л, 08Х14Н7МЛ, 14Х18Н4Г4Л, 10Х18Н9Л и др.; жаростойкие (11 марок) — 40Х9С2Л, 15Х23Н18Л, 20Х25Н19С2Л, 45Х17Г13Н3ЮЛ и др.; жаропрочные (7 марок) —

35X18H24C2Л, 08X17H34B5T3Ю2РЛ, 15X18H22B6M2РЛ и др.; износостойкие (5 марок) — 110Г13Л, 110Г13ФТЛ, 120Г10ФЛ и др.; быстрорежущие — 85X4М5Ф2В6Л (Р6М5Л), 90X4М4Ф2В6Л (Р6М4Ф2Л).

Углеродистые литейные стали обладают высоким пределом прочности при растяжении (400...600 МПа), значительным относительным удлинением (10...24 %), ударной вязкостью, достаточной износостойкостью при ударных нагрузках. Механические качества легированных сталей определяются свойствами легирующих элементов. Легирование значительно повышает механические и эксплуатационные свойства сталей (жаропрочность, коррозионную стойкость, износостойкость и т. д.). Например, марганец повышает износостойкость, хром — жаростойкость, никель — коррозионную стойкость и т. д.

Области применения некоторых литейных сталей представлены в таблице 1.7.

Таблица 1.7

Применение отливок из сталей	
Марка стали	Области применения
1	2
<i>Конструкционные углеродистые стали</i>	
15Л, 20Л	Детали, подвергающиеся ударным нагрузкам (захваты, блоки, ролики и др.) и резким изменениям температуры, арматура и детали трубопроводов
25Л	Станины прокатных станов, шкивы, траверсы, поршни, корпуса подшипников, зубчатые колеса, оси, валы и другие детали, работающие под действием средних статических и динамических нагрузок при температуре от -40 до +450 °С
30Л, 35Л	Корпуса редукторов, муфты, шкивы, маховики и другие детали, работающие под действием средних статических и динамических нагрузок
40Л, 45Л	Станины, корпуса, муфты, тормозные диски, зубчатые колеса, кожухи и другие ответственные детали, к которым предъявляют требования повышенной прочности и высокого сопротивления износу

1	2
50Л, 55Л	Зубчатые колеса, бегунки, зубчатые венцы, зубчатые муфты, ходовые колеса
<i>Конструкционные легированные стали</i>	
20ГЛ, 30ГСЛ	Диски, звездочки, барабаны зубчатые колеса и другие детали, работающие под действием статических и динамических нагрузок
45ФЛ	Износостойкие литые детали для тракторов и металлургического оборудования
35ХГСЛ	Зубчатые колеса, звездочки, оси, валы, муфты и другие ответственные детали, от которых требуется повышенная износостойкость
<i>Легированные стали со специальными свойствами</i>	
40Х9С2Л	Детали, работающие длительное время под нагрузкой при температуре до 700 °С (клапаны моторов, крепежные детали)
14Х18Н4Г4Л, 10Х18Н9Л	Коллекторы выхлопных систем, детали печной арматуры и др.
110Г13Л, 110Г13ФТЛ	Гусеничные траки, звездочки, зубья ковшей экскаваторов и другие детали, работающие на ударный износ
120Г10ФЛ	Звенья гусениц тракторов и другие детали, работающие в условиях абразивного износа

Следует отметить, что литейные свойства сталей значительно хуже, чем у серого чугуна и других сплавов. Жидкотекучесть стали примерно в два раза меньше, чем у чугуна, и возрастает с увеличением содержания в ней С и полноты раскисления стали. Увеличение содержания S и повышенная загрязненность стали тугоплавкими неметаллическими включениями приводит к ухудшению ее жидкотекучести. Усадка стали достигает значительных размеров: объемная — до 7,5 %, линейная — до 2,5 %, т. е. примерно в два раза превышает усадку серого чугуна. Температура стали при заливке, как правило, составляет 1 550...1 600 °С.

**Исходные материалы и оборудование для плавки стали.** Для выплавки литейных сталей применяют следующие плавильные аг-

регаты: дуговые и индукционные печи, установки электрошлакового переплава, кислородные конвертеры.

В электродуговых и индукционных печах выплавляют 90 % литейных сталей, которые применяются для изготовления самых разнообразных по массе и конфигурации отливок. Данные печи используют в цехах массового и среднесерийного производства. Производительность этих печей на 25...30 % выше, чем у других устройств для плавки, а расход электроэнергии — значительно ниже.

В качестве шихтовых материалов для плавки стали в электропечах применяют стальной лом, отходы собственного производства, перепельный чугун, флюсы и другие материалы.

**Особенности литейных форм.** Стальные отливки обычно изготавливают в песчано-глинистых и оболочковых формах, литьем по выплавляемым моделям, центробежным литьем, литьем в кокиль и другими способами.

Для предупреждения усадочных раковин и пористости в отливках на их массивные части устанавливают приливы объемом 50...60 % от общего объема отливки, а в тепловых узлах отливок используют наружные или внутренние холодильники.

Для предупреждения трещин, возникающих из-за неравномерной усадки отливок, формы изготавливают из податливых формовочных смесей. Кроме того, в отливках предусматривают технологические ребра, удаляемые при механической обработке. Высокая температура заливки (1 550...1 600 °C) требует применения формовочных и стержневых смесей с высокой огнеупорностью.

Литниковые системы для мелких и средних отливок выполняют по разьему или сверху, а для массивных — снизу (сифоном). В связи с низкой жидкотекучестью сталей площадь питателей литниковой системы в 1,5...2 раза больше, чем при литье чугуна.

Для получения высоких механических и эксплуатационных свойств стальные отливки подвергают отжигу, нормализации и другим видам термической обработки.

### 3.4. Производство отливок из сплавов на основе меди

Преобладающее большинство отливок из цветных сплавов изготавливают на основе меди и алюминия с различными добавками (Si, Sn, Zn, Pb, Ni, Fe и др.). Количество отливок из цветных металлов невели-

ко и составляет порядка 5 % от всего количества изготавливаемого фасонного литья. Это объясняется высокой стоимостью цветных металлов по сравнению со сталью и чугуном. Как правило, отливки из цветных сплавов применяют для деталей, работающих в особых условиях, когда помимо конструкционной прочности необходимо обеспечить некоторые дополнительные свойства — коррозионную стойкость, антифрикционность, тепло- и электропроводность, немагнитность и др.

**Литейные сплавы на основе меди.** Большое распространение в качестве литейных медных сплавов получили бронзы и латуни. Их применяют для отливок, которые должны иметь хорошую износостойкость и антифрикционные свойства, высокую коррозионную стойкость в воздушной среде, технической и морской воде.

**Латуни** — двойные или многокомпонентные сплавы меди, в которых основным легирующим элементом является цинк. Механические свойства латуней следующие:  $\sigma_b = 150 \dots 700$  МПа,  $\delta = 10 \dots 20$  %,  $HV = 60 \dots 110$ .

Литейные латуни маркируются буквами и цифрами. Буквы используются для обозначения латуни (Л) и элементов сплава: Ц — цинк; А — алюминий; Ж — железо; Мц — марганец; Н — никель; О — олово; С — свинец; К — кремний; Мш — мышьяк. Цифры после буквенного обозначения элементов сплава указывают на их среднюю массовую долю (%). Например, латунь ЛЦ30А3 содержит 30 % Zn и 2...3 % Al (остальное — медь).

Различают следующие марки литейных латуней: ЛЦ14К3С3, ЛЦ16К4, ЛЦ23А6Ж3Мц2, ЛЦ25С2, ЛЦ30А3, ЛЦ37Мц2С2К, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ40Мц3А, ЛЦ40Мц3Ж, ЛЦ40С, ЛЦ40Мц1,5, (ГОСТ 17711-93).

Латуни имеют удовлетворительную жидкотекучесть, высокую усадку (1,6...2,2 %), затвердевают при температуре 30...70 °С, что обуславливает образование усадочных раковин и пористости. Они, как и другие медные сплавы, склонны к образованию трещин.

Влияние легирующих элементов на литейные свойства сплавов бывает различным. Так, железо и марганец снижают жидкотекучесть латуни, а олово (до 2,5 %) — ее повышает. Алюминий и кремний (в отдельности) повышают жидкотекучесть двойных латуней. При этом наличие примесей алюминия в кремнистой латуни ЛЦ16К4 приводит к снижению ее жидкотекучести и способствует возникновению в отливках пористости.

Основные области применения литейных латуней представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.8

Применение литейных латуней	
Марка латуни	Области применения
ЛЦ40С	Для литья арматуры, втулок, сепараторов, шариковых и роликовых подшипников
ЛЦ40Мц3А, ЛЦ38Мц2С2	Для изготовления конструкционных деталей и антифрикционных деталей несложной конфигурации (втулки, вкладыши, ползуны)
ЛЦ37Мц2С2К	Для изготовления коррозионно-стойких деталей, применяемых в машиностроении
ЛЦ30А3	Для изготовления штуцеров гидросистем автомобилей
ЛЦ23А6Ж3Мц2, ЛЦ25С2	Для изготовления ответственных деталей, работающих при высоких удельных и знакопеременных нагрузках, при изгибе, а также антифрикционных деталей (нажимные винты, гайки нажимных винтов, венцы червячных колес, втулки и другие детали)
ЛЦ14К3С3	Для изготовления подшипников и втулок

**Бронзы** — двойные или многокомпонентные сплавы меди с другими элементами.

Литейные бронзы маркируются буквами и цифрами. Буквы используются для обозначения бронзы (Бр) и элементов сплава (по аналогии с латунями). При этом, дополнительно используются следующие буквы: Ф — фосфор, Б — бериллий, Т — титан, Мг — магний, Кд — кадмий, Х — хром, Су — сурьма. Цифры после буквенного обозначения элементов сплава указывают на их среднюю массовую долю (%). Например, бронза БрО3Ц7С5Н1 содержит 3 % Sn, 7 % Zn, 5 % Pb, 1 % Ni (остальное — медь).

Литейные бронзы разделяют на оловянные и безоловянные.

Различают следующие марки оловянных литейных бронз: БрО3Ц12С5, БрО3Ц7С5Н1, БрО4Ц7С5, БрО4Ц4СП, БрО5Ц5С5, БрО5С25, БрО6Ц6С3, БрО8Ц4, БрО10Ф1, БрО10Ц2, БрО10С10 (ГОСТ 613-79). Следует отметить, что легирующие элементы оловя-

ных бронз влияют на их свойства. Так, Sn повышает механические и антифрикционные свойства бронзы, ее коррозионную стойкость, присутствие Zn уменьшает интервал температур, в которых происходит кристаллизация, облегчает сварку и пайку, Pb улучшает жидкотекучесть, обрабатываемость резанием, а также антифрикционные и механические свойства, Ni повышает антифрикционные и механические свойства, P повышает жидкотекучесть и износостойкость.

Механические свойства оловянных литейных бронз следующие:  $\sigma_b = 150...250$  МПа,  $\delta = 3...12$  %, HB = 440...790 МПа. Однако оловянные бронзы характеризуются высокими антифрикционными свойствами, обусловленными большим температурным интервалом кристаллизации и резко выраженной ликвацией.

Из оловянной литейной бронзы изготавливаются паровая и водяная арматура, выдерживающая давление до 2,5 МПа, подшипники для валов, работающие при больших удельных нагрузках и оборотах, шестерни, втулки, работающие в условиях истирания.

Основные области применения оловянных бронз представлены в таблице 1.9.

Таблица 1.9

Применение оловянных литейных бронз

Марка бронзы	Области применения
БрО4Ц4С17, БрО5Ц5С5, БрО6Ц6С3, БрО10Ц2	Арматура, антифрикционные детали, вкладыши подшипников
БрО5С25	Биметаллические подшипники скольжения
БрО10Ф1	Узлы трения арматуры, высоконагруженные детали шнековых приводов, нажимные и шпindelные гайки, венцы червячных шестерен
БрО10С10	Подшипники скольжения, работающие в условиях высоких удельных давлений

Оловянные литейные бронзы имеют хорошую жидкотекучесть, достаточно высокую усадку (1,4...1,6 %). Эти бронзы кристаллизуются в большом интервале температур (150...200 °С), что обуславливает образование в отливках усадочной пористости.

Различают следующие марки *безоловянных литейных бронз*: БрА9Мц2Л, БрА10Мц2Л, БрА9Ж3Л, БрА10Ж3Мц2, БрА10Ж4Н4Л, БрА11Ж6Н6, БрА9Ж4Н4Мц1, БрА7Мц15Ж3Н2Ц2, БрС30, БрСу3Н3Ц3С20Ф (ГОСТ 493-79).

Безоловянные литейные бронзы, как правило, многокомпонентные сплавы. Их механические свойства значительно выше, чем у оловянных, и, кроме того, безоловянные бронзы имеют достаточно высокие антифрикционные свойства и коррозионную стойкость в воде (пресной и морской) и во многих агрессивных средах. Эти бронзы хорошо сопротивляются ударным нагрузкам и обладают меньшим, чем оловянные бронзы, антифрикционным износом.

Безоловянные литейные бронзы применяют для изготовления деталей, подвергающихся эксплуатации в более легких условиях, чем оловянные. Наибольшее распространение получили алюминиевые бронзы с содержанием Al 9...11 % (добавка Al повышает жидкотекучесть, механические и антифрикционные свойства сплавов). Механические, технологические и эксплуатационные свойства таких бронз улучшаются также при их легировании Fe, Mn, Ni, Al и другими элементами.

Безоловянные литейные бронзы имеют высокие механические свойства ( $\sigma_b = 60...610$  МПа,  $\delta = 2...20$  %, НВ = 245...2 450 МПа), а также коррозионные и антифрикционные свойства. Многие из этих бронз хорошо противостоят разрушению в условиях кавитации.

Безоловянные литейные бронзы применяют для изготовления гребных винтов крупных судов, тяжелонагруженных шестерен и зубчатых колес, корпусов насосов, арматуры, работающей в морской воде, деталей химической и пищевой промышленности. Области применения безоловянных литейных бронз представлены в таблице 1.10.

Таблица 1.10

Применение безоловянных литейных бронз	
Марка бронзы	Области применения
БрА9Мц2Л, БрА10Мц2Л	Антифрикционные детали, детали арматуры, работающие в пресной воде, жидком топливе и в паре при температуре до 250 °С
БрС30, БрА9Ж3Л, БрА10Ж3Мц2, БрСу3Н3Ц3С20Ф, БрА7Мц15Ж3Н2Ц2	Арматура, антифрикционные детали

Безоловянистые бронзы обладают высокой жидкотекучестью и большой усадкой (1,6...2,4 %), затвердевают в малом интервале температур при кристаллизации, что приводит к образованию в отливках сосредоточенных усадочных раковин.

**Исходные материалы и оборудование для плавки медных сплавов.** Медные сплавы плавят в индукционных и дуговых печах на воздухе, в среде защитных газов или в вакууме. В качестве шихтовых материалов применяют чистую медь, отходы собственного производства, цинк, олово, свинец, железо, никель и другие металлы.

При плавке на воздухе медь окисляется с образованием оксида меди. Для предохранения от окисления и поглощения водорода плавку ведут под слоем древесного угля. Нагретый до 1 200 °С расплав раскисляют фосфористой бронзой, затем вводят лигатуры или чистые металлы для получения требуемого химического состава.

**Особенности литейных форм.** Отливки из медных сплавов (до 80 % от их общего количества) изготавливают литьем в песчаные и оболочковые формы. Остальное количество отливок — литьем в кокиль, литьем под давлением, центробежным литьем и др.

Для предупреждения образования усадочных раковин и пористости в массивных частях отливки устанавливают прибыли и холодильники. Для предупреждения появления трещин в отливках используют литейные формы с высокой податливостью, для чего в формовочную смесь добавляют опилки.

Для обеспечения плавного поступления металла в форму применяют расширяющиеся литниковые системы с подводом металла (верхним, боковым, щелевым и нижним). Для отделения оксидных пленок в литниках устраивают фильтры из стеклоткани.

### 3.5. Производство отливок из алюминиевых сплавов

Алюминиевые сплавы обладают большой прочностью при нормальной температуре и высокими литейными свойствами, хорошо противостоят коррозии в атмосферных условиях. Высокая жидкотекучесть этих сплавов обеспечивает получение тонкостенных и сложных по форме отливок. Литейная усадка для большинства сплавов составляет 0,9...1,3 %. Сплавы имеют невысокую температуру плавления ( $T_{пл} = 550...650$  °С),  $\rho = 2,9...3,0$  г/см<sup>3</sup>,  $\sigma_b = 130...360$  МПа;  $\delta = 1,5...12\%$ , HB = 50...90.

Алюминиевые литейные сплавы маркируются буквами и цифрами. Буква А означает, что сплав алюминиевый литейный, остальные буквы обозначают элементы сплава (К — кремний, М — медь, Н — никель, Ц — цинк, Су — сурьма, Мг — магний, Кд — кадмий, Мц — марганец). Цифры после букв обозначают среднюю массовую долю соответствующего элемента (%). Буквы в конце марки обозначают следующее: ч — чистый, пч — повышенной чистоты, оч — особой чистоты, л — литейные сплавы, с — селективный. Рафинированные сплавы в чушках обозначают буквой р, которую ставят после обозначения марки сплава.

Для изготовления отливок в промышленности используют пять групп алюминиевых сплавов (ГОСТ 1583-93):

I. сплавы на основе системы «алюминий–кремний» (силумины) — марки АК12, АК13, АК9, АК9с, АК9ч, АК9пч, АК8л, АК7, АК7ч, АК7пч, АК10Су.

II. сплавы на основе системы «алюминий–медь–кремний» (алюкусины) — марки АК5М, АК5Мч, АК5М2, АК5М7, АК6М2, АК8М, АК5М4, АК8М3, АК8М3ч, АК9М2, АК12М2, АК12ММгН, АК12М2МгН, АК21М2,5Н2,5;

III. сплавы на основе системы «алюминий–медь» — марки АМ5, АМ4,5Кд;

IV. сплавы на основе системы «алюминий–магний» — марки АМг4К1,5М, АМг5К, АМг3Мц, АМг6л, АМг6лч, АМг10, АМг10ч, АМг11, АМг7;

V. сплавы алюминия с прочими компонентами (сложнолегированные) — марки АК7Ц9, АК9Ц6, АЦ4Мг.

Сплавы системы «алюминий–кремний» (силумины) получили наибольшее распространение, поскольку они обладают лучшими из всех алюминиевых сплавов литейными свойствами. Эти сплавы широко применяются для отливок деталей, отличающихся сложностью очертаний или несущих большие нагрузки. Силумины обладают удовлетворительной коррозионной стойкостью. Детали из них защищают анодированием и лакокрасочными покрытиями. Силумины используют в авиационной, машиностроительной, судостроительной и электротехнической промышленности.

Добавление меди к сплавам Al–Si приводит к повышению твердости и предела прочности при растяжении, а также значительно улучшает обрабатываемость резанием. Тройные сплавы

системы «алюминий–медь–кремний» (*алькусины*) идут на изготовление особо ответственных деталей (например, головок цилиндров двигателей, поршней, деталей, работающих при повышенной температуре, и др.). Сплавы системы «Al–Cu–Si» широко используют в промышленности для изготовления деталей достаточной прочности, сохраняющих постоянство размеров в процессе эксплуатации и имеющих высокую чистоту обработанной поверхности.

Сплавы системы «алюминий–медь» имеют пониженные литейные свойства, малую коррозионную стойкость и недостаточную пластичность, но хорошо обрабатываются резанием. Применяют эти сплавы для отливки небольших деталей, несущих высокую статическую и ударную нагрузку, а также ответственных деталей машин и приборов.

Сплавы системы «алюминий–магний» характеризуются малой плотностью, высокой коррозионной стойкостью и прочностью. Применяют эти сплавы для изготовления сильно нагруженных деталей, однако они плохо работают при повышенных температурах. Из этих сплавов изготавливают арматуру и корпуса машин, устанавливаемых на морских судах.

*Сложнолегированные* сплавы применяют для изготовления отливок с повышенной стабильностью размеров и работающих при повышенных температурах и давлениях, а также для изготовления сварных конструкций и деталей, хорошо обрабатываемых резанием.

Области применения некоторых марок литейных алюминиевых сплавов представлены в таблице 1.11.

Для повышения механических свойств отливок из алюминиевых сплавов их часто подвергают термической обработке, после которой в некоторых случаях прочность отливок увеличивается почти в два раза.

**Исходные материалы и оборудование для плавки алюминиевых сплавов.** Выплавку алюминиевых сплавов производят в электрических и пламенных печах. Широкое распространение получили электрические печи сопротивления, в которых нагревательные элементы из нихрома расположены в своде печи. Современными плавильными агрегатами являются также индукционные печи.

Применение литейных алюминиевых сплавов

Марка сплава	Области применения
АК12	Детали для автомобиле- и тракторостроения (картеры, блоки цилиндров, поршни двигателей внутреннего сгорания)
АК9, АК7	Корпуса водяных насосов, компрессоров, картеры и блоки цилиндров двигателей внутреннего сгорания, системы водяного охлаждения
АК8М	Блоки цилиндров, головки блоков и других деталей автомобильных двигателей
АК5М	Головки цилиндров двигателей воздушного охлаждения

Основными особенностями при плавке алюминиевых сплавов, являются их склонность к поглощению газов (особенно водорода) и легкая окисляемость. Водород выделяется при охлаждении и затвердевания сплава в форме, способствуя образованию газовой пористости в отливках. Включения  $Al_2O_3$  значительно снижают механические свойства сплава. Для защиты от поглощения газов и окисления плавку проводят под слоем флюсов, состав которых выбирают в зависимости от выплавляемого сплава. В состав флюсов входит  $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $CaF_2$  и другие компоненты.

Для более полного удаления из сплава газов, неметаллических, оксидных и других включений проводят его дегазацию и рафинирование хлором или азотом. Пузырьки газа оказывают флотирующее действие на взвешенные неметаллические включения, вынося их на поверхность сплава. При этом обеспечивается удаление водорода, диффундирующего из металла внутрь газовых пузырьков.

Модифицирование сплава для получения мелкодисперсной структуры и улучшения его механических свойств применяют к силуминам, содержащим более 6 % Si, используя, главным образом, смеси  $NaCl$ ,  $NaF$ . Наиболее распространенный способ модифицирования состоит в том, что модификатор насыпают на поверхность расплава и после выдержки (10...15 мин) его замешивают (2...3 мин).

**Особенности литейных форм.** Способы отливки деталей зависят от их размеров, сложности конфигурации, массы, требова-

ний к металлу по механическим свойствам. В массовом производстве относительно небольших деталей широкое применение получили: литье под давлением, в кокиль, а также другие специальные способы литья.

При литье в песчано-глинистые формы для получения ровной поверхности применяют мелкодисперсные формовочные смеси. Большое значение для получения качественных отливок имеет устройство литниковой системы. Для алюминиевых сплавов применяют расширяющиеся литниковые системы, обеспечивающие уменьшение скорости протекания металла при выходе из питателей и тем самым способствующие отделению неметаллических частиц. В шлакоуловителях часто устанавливают фильтры из стеклоткани и других материалов. Заливку сплавов производят непрерывной струей без захвата воздуха и вспенивания для предупреждения окисления.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Литейные свойства сплавов (жидкотекучесть, усадка, ликвация, склонность к газопоглощению и к трещинообразованию).
2. Литейные чугуны (маркировка, применение, оборудование для плавки, особенности литейных форм, литейные свойства).
3. Литейные стали (маркировка, применение, оборудование для плавки, особенности литейных форм, литейные свойства).
4. Отливки из медных сплавов (маркировка, применение, оборудование для плавки, особенности литейных форм, литейные свойства).
5. Отливки из алюминиевых сплавов (маркировка, применение, оборудование для плавки, особенности литейных форм, литейные свойства).

## 4. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ ЛИТЬЯ

Качество отливок, полученных в ПГФ, а именно, точность геометрических размеров, степень шероховатости поверхности и др., во многих случаях не удовлетворяют требованиям современной техники. Поэтому в современном литейном производстве все более широкое применение получают специальные способы литья: литье по выплавляемым моделям, литье в оболочковые формы, литье в кокиль, литье под давлением, центробежное литье и др.

### 4.1. Литье по выплавляемым моделям

Прообразом современного процесса изготовления отливок по выплавляемым моделям является известный со времен глубокой древности метод восковой формовки. При изготовлении художественных отливок, ювелирных изделий, а также зубных протезов этот метод литья по выплавляемым моделям применяют и в настоящее время.

Одним из образцов высокого мастерства литейщиков прошлого является отлитая по выплавляемым моделям конная статуя Петра I («Медный всадник», Э.М. Фальконе, 1782 г.) (рис. 1.30).



Рис. 1.30. Памятник Петру Первому в Санкт-Петербурге

**Литье по выплавляемым моделям** — специальный способ литья, заключающийся в получении отливок заливкой расплавленного металла в разовую тонкостенную неразъемную литейную форму, которую изготавливают из огнеупорной суспензии по разовым моделям из легкоплавкого материала.

Технологическая схема получения отливок данным методом показана на рисунке 1.31. Технологический процесс изготовления отливок литьем по выплавляемым моделям состоит из следующих основных операций.

*Изготовление моделей.* Модельный состав, состоящий из двух или более легкоплавких компонентов (парафина, стеарина, церезина и др.) в пастообразном состоянии запрессовывают в пресс-форму, внутренняя полость которой соответствует наружной конфигурации модели (рис. 1.31, а). В качестве материала пресс-

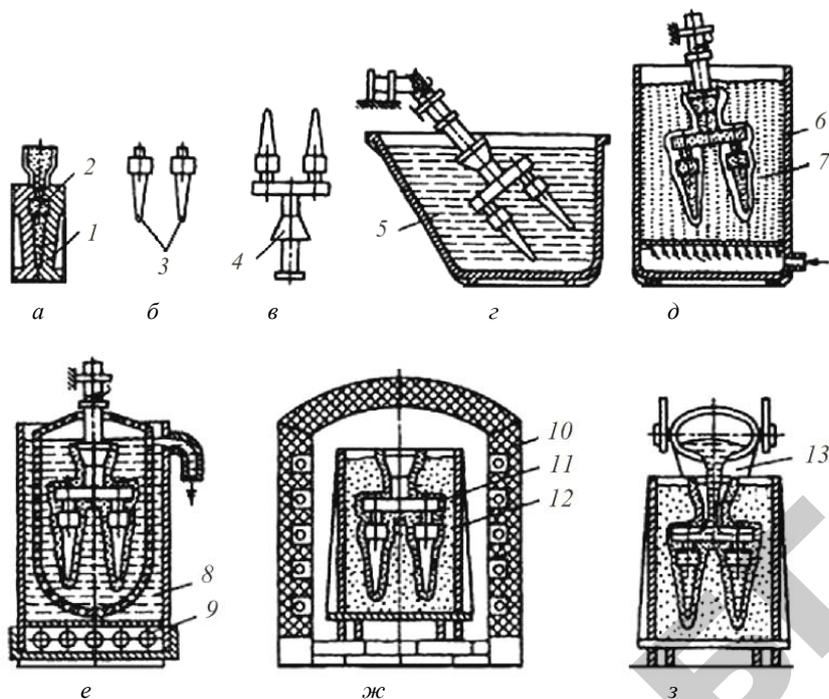


Рис. 1.31. Последовательность операций (а...з) процесса литья по выплавляемым моделям: 1 — пресс-форма; 2 — модельный состав; 3 — модель; 4 — модельный блок; 5 — емкость с керамической суспензией; 6 — специальная установка для обсыпки; 7 — кварцевый песок; 8 — бак с водой; 9 — устройство для нагрева воды; 10 — электрическая печь; 11 — оболочки; 12 — жаростойкая опока; 13 — ковш с расплавленным металлом

форм в зависимости от вида производства используют гипс, пластмассы, легкоплавкие металлы, сплавы, сталь или чугун.

После затвердевания модельного состава пресс-форма раскрывается и модель (рис. 1.31, б) выталкивается в ванну с холодной водой. Аналогичным образом изготавливают модели литниковой системы.

*Сборка модельных блоков.* Модели собирают в модельные блоки (рис. 1.31, в) с общей литниковой системой. В один блок объединяют от 2 до 100 моделей. Соединяют модели в кондукторе, скрепляя (механически) или склеивая их. Для сборки моде-

лей в блоки в кондукторе выставляют металлические стояки из алюминия, наращивают на них слой модельного состава толщиной 2...5 мм и крепят к нему модели. Этот прием ведет к повышению прочности блока, сокращению расхода состава, обеспечению удобства транспортирования, хранения и просушивания блоков при нанесении обмазки.

*Подготовка керамической суспензии.* Тщательно перемешивают огнеупорный материал — пылевидный кварц (маршалит), электрокорунд со связующим (гидролизным раствором этилсиликата) и получают керамическую суспензию.

*Покрывание моделей огнеупорной оболочкой.* Модельный блок погружают в керамическую суспензию, налитую в емкость (рис. 1.31, з), извлекают из нее и обсыпают мелкодисперсным кварцевым песком в специальной установке (рис. 1.31, д).

Затем модельные блоки сушат на воздухе (2...2,5 ч) или в среде аммиака (20...40 мин). На модельный блок наносят слой (4...6) огнеупорного покрытия (маршалита) с последующей сушкой каждого слоя.

*Удаление модели из форм* (рис. 1.31, е). Удаление моделей производят их выплавлением в горячей воде (80...90 °С). При выдержке в горячей воде в течение нескольких минут модельный состав расплавляется, всплывает на поверхность ванны, откуда периодически удаляется для повторного использования.

*Подготовка литейных форм к заливке.* После извлечения из ванны оболочек, их промывают водой и сушат (1,5...2 ч) в шкафах при температуре 200 °С. Затем оболочки ставят вертикально в жаростойкой опоке, вокруг засыпают сухой кварцевый песок и уплотняют его. После этого форму помещают в электрическую печь (рис. 1.31, ж), в которой прокалывают форму (не менее 2 ч) при температуре 900...950 °С. В печи частички связующего спекаются с частичками огнеупорного материала, влага испаряется, и остатки модельного состава выгорают.

*Заливка формы металлом.* Заливка расплавленного металла из ковша производится в горячую литейную форму сразу же после прокалки (рис. 1.31, з).

*Извлечение и окончательная обработка отливок.* После охлаждения отливки форму разрушают. Отливки отделяют от литниковой системы и для окончательной очистки направляют на

химическую очистку в растворе едкого натра при температуре 150 °С. Затем отливки промывают проточной водой, сушат, подвергают термической обработке и контролю.

Одним из направлений развития данного метода литья является применение легкорастворимых и газифицируемых моделей взамен выплавляемых. В качестве легкорастворимых материалов используют мочевины с добавкой полиэфирного спирта, а в качестве газифицируемых — вспененный полистирол.

К *преимуществам* способа литья по выплавляемым моделям относятся следующие:

- 1) возможность получения изделий сложной конфигурации, а также тонкостенных деталей с толщиной стенки 1 мм и менее;
- 2) возможность получения отливок, максимально приближенных по форме и размерам к готовым деталям, а также с малой шероховатостью поверхности;
- 3) возможность получения отливок практически из любых металлов и сплавов;
- 4) возможность объединять отдельные детали в компактные цельнолитые узлы, уменьшая массу и габаритные размеры получаемых изделий;
- 5) возможность механизации и автоматизации процесса изготовления форм и непосредственно самого процесса литья.

*Недостатками* литья по выплавляемым моделям являются следующие:

- 1) многооперационность, трудоемкость и длительность процесса литья;
- 2) использование большой номенклатуры материалов;
- 3) сложность управления качеством отливок из-за большого числа технологических факторов, влияющих на процесс литья.

Литье по выплавляемым моделям используют в различных отраслях машиностроения и приборостроения. В частности, при производстве автомобилей (полумуфты, патрубки, распределительные диски, поршневые кольца и т. д.), сельскохозяйственных машин, гидромашин при литье жаропрочных труднообрабатываемых сплавов (лопатки турбин), коррозионно-стойких сталей (колеса насосов), углеродистых сталей в массовом производстве (крыльчатки, решетки, распылители, рукоятки, ключи и другие детали высокой точности) (рис. 1.32).

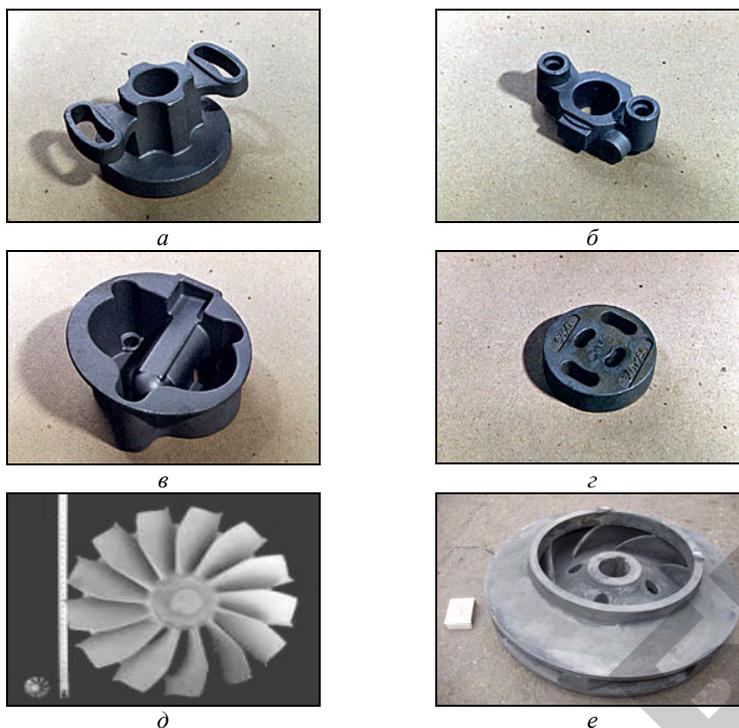


Рис. 1.32. Примеры отливок, полученных литьем по выполняемым моделям: *a* — полумуфта ведомая двигателя автомобиля (сталь 35Л); *б* — полумуфта ведущая двигателя автомобиля (сталь 40Х); *в* — патрубок приемный двигателя автомобиля (СЧ 24); *г* — диск распределительный гидравлического усилителя руля автомобиля (СЧ 25); *д* — лопатки газовых турбин на основе никеля и кобальта; *е* — рабочее колесо шахтного насоса (ВЧ 50)

#### 4.2. Литье в оболочковые формы

Технология изготовления оболочковых форм (метод Кронинга) была разработана Иоханнесом Кронингом (Johannes Croning) и запатентована в Гамбурге в 1944 г. Технология изготовления оболочковых форм предполагала изготовление смеси из порошка терморезистивной смолы (пудрвербакелита) и песка, с последующей засыпкой в подогретую модель для образования оболочки (корки).

**Литье в оболочковые формы** — специальный способ литья, заключающийся в изготовлении отливок путем заливки расплав-

ленного металла в разовую тонкостенную разъемную литейную форму (оболочку), изготовленную из песчано-смоляной смеси.

Материалом для изготовления оболочек служат смоляные смеси быстрого затвердевания. В качестве наполнителя используют мелкодисперсный кварцевый песок (маршалит). В качестве связующего широко применяют термореактивную смолу (пультвербакелит) — фенолформальдегидную смолу с добавками отвердителя (уротропина). Такая смола при нагревании претерпевает ряд необратимых изменений. Так, при комнатной температуре пультвербакелит представляет собой твердый порошок, который при нагревании до 70...80 °С размягчается, а при температуре 100...120 °С плавится, превращаясь в клейкую жидкость, покрывающую поверхность частиц песка тонкой пленкой. При дальнейшем нагреве (до 200...250 °С) смола необратимо затвердевает, обеспечивая высокую прочность оболочковой формы. При дальнейшем нагревании (выше 400...450 °С) смола начинает выгорать, что приводит к снижению, а затем полной потере прочности форм-оболочек.

Способы изготовления оболочковых форм различаются, в основном, по приемам нанесения песчано-смоляной смеси на модельную оснастку. Наиболее распространенным процессом формообразования оболочки является бункерный метод, заключающийся в свободной засыпке модельной оснастки смесью с помощью поворотного бункера. Модельная оснастка для изготовления оболочковых форм включает металлические модели и подмодельные плиты, приспособления для съема оболочек с подмодельной плиты и др.

Технология изготовления оболочек и получения отливок бункерным методом (рис. 1.33) включает следующие операции.

Модельную плиту с закрепленной на ней моделью предварительно нагревают до температуры 200...250 °С и покрывают разделительным составом, например, силиконовой жидкостью (кремнийорганическое соединение). Она быстро затвердевает, образуя разделительную пленку, что устраняет последующее прилипание формовочной смеси и облегчает снятие оболочки с модели.

Модельную плиту с моделью закрепляют на опрокидывающемся бункере (рис. 1.33, а).

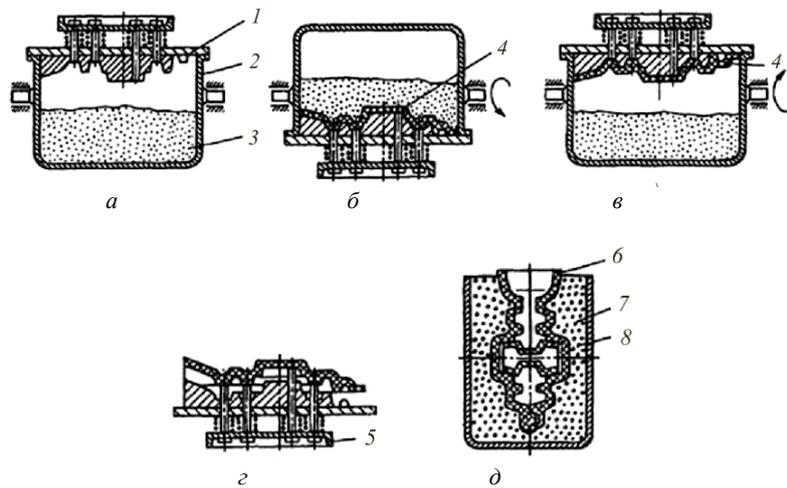


Рис. 1.33. Последовательность операций формовки (а...д) при литье в оболочковые формы: 1 — модельная плита; 2 — бункер; 3 — формовочная смесь; 4 — песчано-смоляная оболочка; 5 — специальные толкатели; 6 — оболочковые формы; 7 — опоки-контейнеры; 8 — металлическая дробь

Бункер с формовочной смесью поворачивают на  $180^\circ$  (рис. 1.33, б). Формовочная смесь, состоящая из мелкодисперсного кварцевого песка (93...96 %) и пульвербакелита (4...7 %), насыпается на модельную плиту с закрепленной на ней моделью и выдерживается (10...30 с). Расплавление термореактивной смолы приводит к склеиванию песчинок и образованию полутвердой песчано-смоляной оболочки толщиной 5...20 мм (в зависимости от времени выдержки).

Бункер возвращают в исходное положение (рис. 1.33, в), излишки формовочной смеси ссыпаются на дно бункера, а модельная плита с моделью с полутвердой оболочкой снимается с бункера и нагревается в печи (1...1,5 мин) при температуре 300...350 °С. При этом пульвербакелит переходит в твердое необратимое состояние.

Твердую оболочку снимают с модели специальными толкателями (рис. 1.33, г). Аналогичным способом изготавливают вторую полуформу.

Готовые оболочковые полуформы склеивают быстротвердеющим клеем на специальных прессах или скрепляют скобами.

Заливку форм производят в вертикальном или горизонтальном положении. Собранные формы с горизонтальной плоскостью раз-

ема укладывают для заливки на слой песка. При заливке в вертикальном положении литейные формы помешают в опоки-контейнеры и засыпают кварцевым песком или металлической дробью (рис. 1.33, д) для предохранения от преждевременного разрушения оболочки при заливке расплава.

Выбивку отливок осуществляют на специальных выбивных или вибрационных установках, разрушая оболочки. При очистке отливок удаляют заусенцы, зачищают на шлифовальных кругах места подвода питателей и затем их подвергают дробеструйной обработке.

Обычно толщина оболочек для мелкого литья составляет 8...10 мм, для среднего — 12...15 мм. Расход формовочной смеси составляет 0,2...1,0 т на одну тонну отливок, которые имеют на 40...50 % меньшие припуски на механическую обработку, чем отливки, изготовленные в песчано-глинистых формах.

Получению качественных отливок способствует высокая газопроницаемость оболочковых форм, защита поверхности отливок от пригара тонкой газовой прослойкой, образующейся между отливкой и формой при выгорании смолы, податливость формы, которая по мере выгорания смолы теряет прочность и разрушается, не препятствуя свободной усадке сплава.

К *преимуществам* способа литья в оболочковые формы можно отнести следующие:

1) уменьшение шероховатости поверхности и существенное улучшение товарного вида отливок, обусловленное использованием мелкодисперсного песка и металлической оснастки, обеспечивающей получение гладкой рабочей поверхности форм и стержней;

2) высокая точность размеров, достигаемая тем, что при заливке форм они имеют большую прочность и жесткость;

3) возможность получения тонкостенных отливок со сложным рельефом, а также толстостенных отливок с литыми каналами малых сечений, обусловленная также податливостью оболочковой формы;

4) повышение производительности за счет уменьшения трудоемкости операций технологического процесса (приготовление формовочной смеси, изготовление форм, очистка отливок и т. п.);

5) уменьшение металлоемкости формовочного оборудования.

*Недостатками* литья по выплавляемым моделям являются следующие:

1) ограничение размеров и массы отливок (за счет недостаточной прочности оболочек и возможности преждевременного их разрушения от перегрева при заливке большего количества металла);

2) повышенное выделение вредных веществ (из-за термического разложения смоляного связующего).

Литье в оболочковые формы применяется для изготовления отливок из черных и цветных сплавов массой до 200 кг с максимальными размерами до 250 мм. Данный метод эффективно применяется для крупносерийного производства отливок массой 5...15 кг, с толщиной стенки 3...15 мм в сельскохозяйственном машиностроении, а также автомобиле- и тракторостроении. Минимальная серийность деталей, получаемых литьем в оболочковые формы, должна составлять не менее 200 отливок в год. Литьем в оболочковые формы изготавливают ответственные детали, например, ребристые цилиндры для мотоциклов, коленчатые валы для автомобилей, гильзы, звездочки, зубчатые колеса, детали компрессоров, тепловозов, судовых двигателей из чугуна, углеродистых сталей, цветных и специальных сплавов (рис. 1.34).

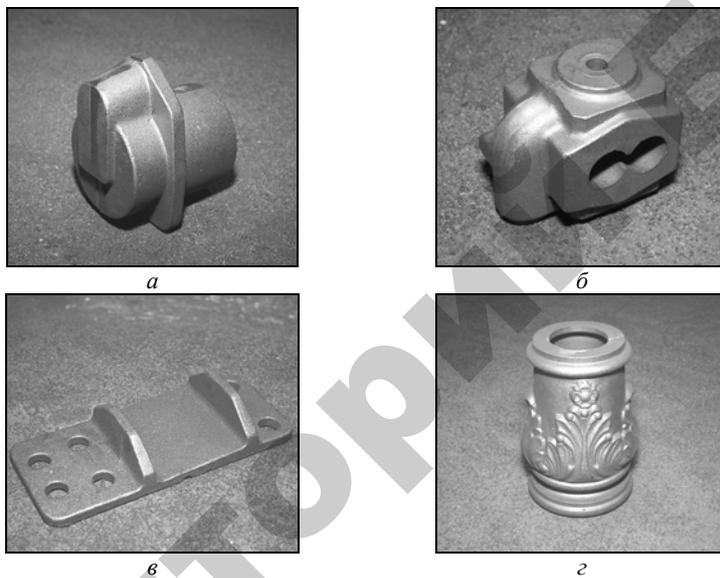


Рис. 1.34. Примеры отливок, полученных литьем в оболочковые формы: *а* — цилиндр горного оборудования (СЧ 20); *б* — корпус насоса (СЧ 20); *в* — подкладка (сталь 25Л); *г* — база (СЧ 15)

### 4.3. Литье в кокиль

Начало возникновения литья в кокиль относят к периоду становления на территории Северного Причерноморья Скифии. Народы этой страны около 2,5 тыс. лет тому назад уже умели изготавливать в кокилях наконечники стрел.

Опыт скифского литья в кокиль был утрачен и возрожден в России лишь в XVII в. С этого периода происходило развитие кокильного литья. Однако практически до конца двадцатых годов XX столетия для получения отливок использовали простые ручные вытряхные кокили, которые устанавливали на подставки и простейшие по конструкции ручные станки. Позднее стали создавать кокильные машины с пневматическими и гидравлическими приводами.

В послевоенный период в СССР и за рубежом началось создание простейших вертикально и горизонтально замкнутых кокильных конвейеров, на которых устанавливали ручные и реже механизированные вытряхные (иногда разъемные) кокили.

**Литье в кокиль** — это процесс получения отливок путем свободной (под действием сил тяжести) заливки расплавленного металла в металлическую форму.

*Кокиль* представляет собой закрытую металлическую литейную форму с внутренней полостью, соответствующей конфигурации изделия. Расплав заливают в кокиль через литниковую систему, выполненную в его стенках. При заполнении кокиля расплавом воздух и газы удаляются из его рабочей полости через вентиляционные выпоры, проницаемые венты, пробки и специальные каналы. Кокили изготавливаются из серого (СЧ15, СЧ18, СЧ20, СЧ25) и высокопрочного чугунов (ВЧ40, ВЧ45), конструкционных углеродистых (10, 20, 15, 25) и легированных (15ХМ) сталей, медных (латуни) и алюминиевых (АК12, АК9ч, АК7ч, АК7Ц9) сплавов.

Для повышения стойкости кокиля и предупреждения поверхностной закалки стали или отбеливания чугуна на внутреннюю поверхность кокиля наносят огнеупорные облицовочные покрытия и краски. Так, для получения отливок сложной формы, а также тонкостенных из стали и чугуна на внутреннюю поверхность кокиля наносят облицовочные покрытия из стержневых смесей толщиной 2...5 мм, а для крупных и толстостенных отливок — из формовочных смесей толщиной 6...12 мм. Краски для предотвращения пригара и улучшения качества поверхности отливок наносят пульверизатором или кистью перед каждой заливкой.

Для формирования внутренних полостей в кокиль закладываются стержни, которые могут быть металлическими или песчаными. Так, для изготовления стержней многократного действия, работающих в условиях воздействия больших тепловых и механических нагрузок, используют легированные стали 30ХГС, 35ХГСА, 4Х5МФС и др.

Конструкции кокилей чрезвычайно разнообразны. Они могут быть неразъемными и разъемными. В неразъемных кокилях изготавливают отливки простой формы. В зависимости от расположения поверхности разъема кокиля бывают с вертикальной, горизонтальной или сложной поверхностью разъема.

На рисунке 1.35 приведен кокиль с вертикальной линией разъема. Он состоит из двух полуформ 1 и 4, соответствующих двум полуформам при литье в песчаные формы. Рабочая полость 10 кокиля соответствует внешней конфигурации отливки. Для образования полости в отливке в кокиле установлены песчаные стержни 5. Для удаления воздуха при заливке жидкого металла в плоскости разъема кокиля или в стержне

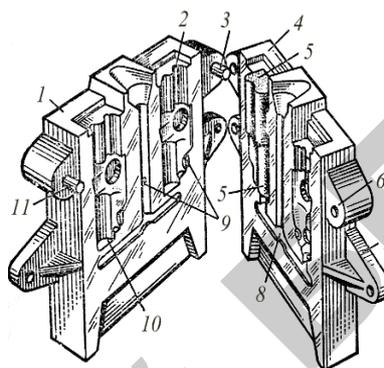


Рис. 1.35. Кокиль с вертикальной плоскостью разъема

предусматривают каналы — выпоры 2. Для центрирования двух половин кокиля служат штыри 11, 3 и втулки 6. Кокиль заполняют металлом через литниковую систему 8. Отливки выталкивают из кокиля толкателями через отверстие 9. К литейному станку кокиль прикрепляют приливами 7.

Интенсивность теплообмена при литье в кокиль в 3...10 раз больше, чем при литье в песчано-глинистые формы, что способствует получению отливок с мелкозернистой структурой. Вместе с тем быстроохлаждающийся при заливке металл теряет свою жидкотекучесть, что затрудняет получение тонкостенных отливок и отливок сложной формы. Поэтому перед заливкой кокиль предварительно нагревают до определенной оптимальной температуры (100...500 °С).

Технологический процесс кокильного литья требует специальной подготовки кокиля к заливке и включает следующие операции:

- 1) предварительную чистку рабочей поверхности кокиля;
- 2) нанесение на рабочие поверхности кокиля облицовочного покрытия или краски;
- 3) нагрев кокиля до оптимальной (для каждого сплава своей) температуры;
- 4) сборка кокиля (установка стержней и соединение металлических полуформ);
- 5) заливка жидкого металла в форму;
- 6) охлаждение отливки;
- 7) разборка кокиля и извлечение отливки.

Литье в кокиль является одним из прогрессивных способов изготовления отливок. Кокиль — форма многократного использования. В одном кокиле можно изготовить 300...500 стальных отливок массой 100...150 кг, около 5 000 чугунных мелких отливок, несколько десятков тысяч отливок из алюминиевых сплавов.

К *преимуществам* литья в кокиль относятся следующие:

- 1) многократное использование форм и возможность механизации и автоматизации процессов литья, что обеспечивает высокую производительность при значительном снижении трудоемкости и стоимости отливок;
- 2) высокое качество поверхности и точность размеров отливок с минимальными припусками на механическую обработку;
- 3) возможность получения отливок различной конфигурации практически из любых сплавов;
- 4) получение мелкозернистой структуры сплавов из-за их быстрого затвердевания, что обуславливает высокие механические свойства сплавов.

*Недостатками* литья в кокиль являются следующие:

- 1) высокая стоимость кокилей;
- 2) трудоемкость в изготовлении кокилей для получения тонкостенных и сложных по конфигурации отливок;
- 3) низкая стойкость кокиля при литье тугоплавких сплавов;
- 4) склонность отливок к образованию трещин и короблению из-за неподатливости формы.

Методом литья в кокиль получают, в основном, отливки на основе меди, алюминия, магния, а также из стали и чугуна массой до 2 000 кг.

Известен опыт получения кокильных отливок массой до 14 т. В кокилях получают 45 % всех алюминиевых и магниевых отливок, 6 % стальных отливок, 11 % чугуновых.

Этот способ литья применяют, как правило, в серийном и массовом производстве. Это простые по форме отливки (опорные плиты, колошники, болванки, втулки и т. п.) и сложные по форме отливки (картеры двигателей, головки блоков цилиндров, ребристые корпуса электродвигателей, стойки плугов и т. д.) (рис. 1.36).

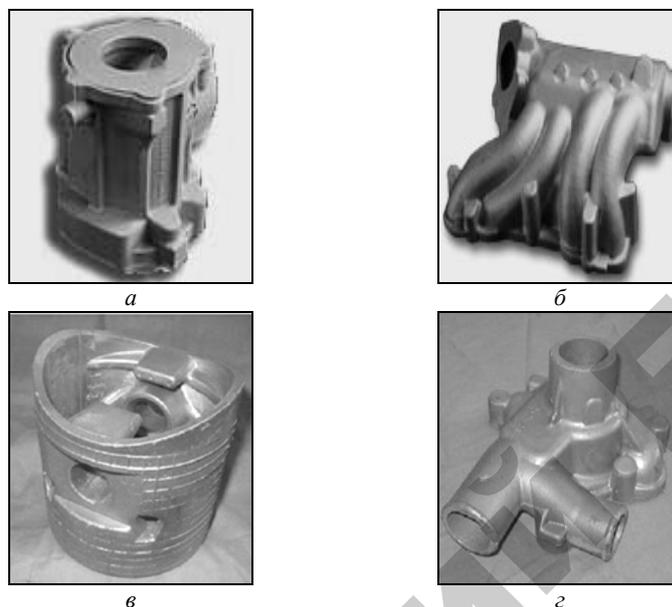


Рис. 1.36. Примеры отливок, полученных литьем в кокиль: *а* — корпусная деталь гидроусилителя руля (АК9ч); *б* — ресивер для инжекторных двигателей (АК9ч); *в* — поршень (АК12); *г* — корпус водяного насоса (АК7)

#### 4.4. Литье под давлением

**Литье под давлением** — способ литья, который заключается в получении отливок в металлических формах, когда заполнение их расплавом с последующей его кристаллизацией происходит под действием внешних сил, превосходящих силы гравитации. Металлическая форма, используемая при литье под давлением, называется

ся *пресс-формой*. Расплавленный металл заполняет пресс-форму под давлением до 300 МПа и быстро затвердевает. Пресс-форма раскрывается, и готовая отливка удаляется толкателем.

Отличительные особенности литья под давлением следующие. Значительное давление на расплав (до 300 МПа) обеспечивает высокую скорость движения расплава в форме (0,5...120 м/с). Форма заполняется за доли (десятые и сотые) секунды, что позволяет получать отливки толщиной менее 1 мм. Высокая скорость впуска расплава в полость пресс-формы не позволяет воздуху полностью удалиться из ее полости. Он попадает в расплав, что приводит к образованию газовоздушных пор, снижению плотности, ухудшению герметичности отливок и пластических свойств сплавов.

Высокая интенсивность теплового взаимодействия между расплавом, отливкой и пресс-формой способствует образованию мелкодисперсной структуры в поверхностных слоях отливки, что повышает ее прочность. Давление, прикладываемое к расплаву, позволяет регулировать продолжительность заполнения пресс-формы и количество теплоты, отводимой от расплава за время ее заполнения.

Для изготовления отливок литьем под давлением применяются специальные машины литья под давлением с холодной (горизонтальной или вертикальной) и горячей камерами прессования.

На *машинах с горизонтальной холодной камерой прессования* (рис. 1.37) порцию расплавленного металла заливают в камеру прессования (рис. 1.37, а), из которой плунжером под давлением 40...100 МПа расплав подают в полость пресс-формы (рис. 1.37, б), состоящую из двух частей (неподвижной 3 и подвижной 1).

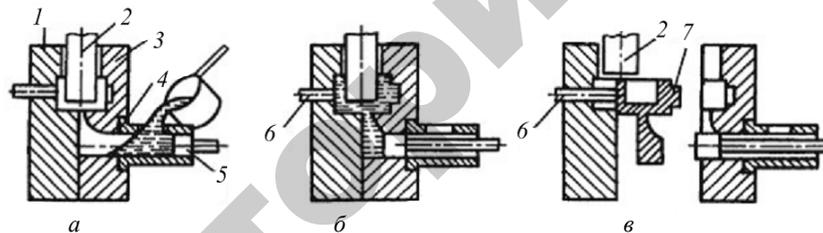


Рис. 1.37. Схема процесса изготовления отливок на машинах литья под давлением с горизонтальной холодной камерой прессования:

1 — подвижная полуформа; 2 — стержень; 3 — неподвижная полуформа;  
4 — камера прессования; 5 — плунжер; 6 — выталкиватели; 7 — отливка

Внутреннюю полость в отливке формируют при помощи стержня 2. После затвердевания отливки пресс-форма раскрывается (рис. 1.37, в), стержень извлекается и отливка удаляется из рабочей полости пресс-формы выталкивателями.

Перед заливкой пресс-форму нагревают до температуры 120...320 °С. После удаления отливки рабочую поверхность пресс-формы обдувают воздухом и смазывают специальными материалами для предупреждения приваривания отливки к пресс-форме. Перед заливкой расплавленного металла воздух и газы удаляют из рабочей полости пресс-формы вакуумированием. Такие машины применяют для изготовления отливок массой до 45 кг из медных, алюминиевых, магниевых и цинковых сплавов.

На машинах с горячей камерой прессования (рис. 1.38) камера прессования 2 расположена в обогреваемом тигле 1, в котором в течение рабочей смены находится расплавленный металл. При верхнем положении плунжера 3 расплавленный металл через отверстие заполняет камеру прессования. При движении плунжера вниз отверстия перекрываются, сплав под давлением 10...30 МПа заполняет полость пресс-формы 4. После затвердевания отливки плунжер возвращается в исходное положение, остатки расплавленного металла из канала сливаются в камеру прессования, а отливка удаляется из пресс-формы выталкивателями 5.

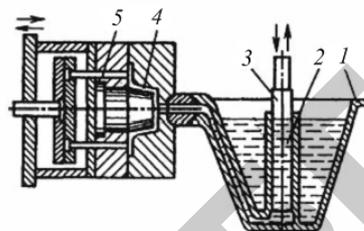


Рис. 1.38. Схема процесса изготовления отливок на машинах с горячей камерой прессования:  
1 — тигель; 2 — камера прессования;  
3 — плунжер; 4 — полость пресс-формы; 5 — выталкиватели

Машины с горячей камерой прессования используются при изготовлении мелких и сложных отливок из магниевых, цинковых, оловянных, свинцово-сурьмянистых и других легкоплавких сплавов массой от нескольких граммов до 25 кг.

Срок службы пресс-форм для литья под давлением составляет сотни тысяч заполнений для цинковых и магниевых сплавов и десятки тысяч для алюминиевых и медных. Отливки могут иметь простую и сложную конфигурации, толщину стенок 0,5...5 мм, массу до 30 кг, размеры до 1,5 м.

К преимуществам литья под давлением относятся следующие:

- 1) высокая производительность процесса и возможность его автоматизации;
- 2) высокая точность размеров и качество поверхности отливки, что позволяет получать не заготовки, а готовые изделия, почти не требующие дальнейшей обработки резанием.

Основными недостатками литья под давлением являются следующие:

- 1) высокая стоимость пресс-форм и литейного оборудования;
- 2) ограниченность размеров и массы отливок (до 50 кг);
- 3) наличие газоусадочной пористости в массивных частях отливок, приводящей к снижению плотности и пластичности деталей, невозможности их последующей термической обработки.

Литье под давлением экономически целесообразно для крупносерийного и массового производства точных отливок из легкоплавких сплавов и занимает одно из ведущих мест в литейном производстве. Этим способом получают отливки, которые по конфигурации и размерам наиболее близки к готовым деталям.

Современные машины для литья под давлением имеют полностью автоматизированный рабочий цикл с программным управлением. При этом автоматизированы регулировка усилия смыкания пресс-форм, изменение скорости прессования, блокировка узлов при появлении неисправностей в машине.

Литьем под давлением можно получать отливки с внешней или внутренней резьбой (барашковые гайки и винты, колпачковые гайки с фигурными головками, штепсельные разъемы), а также со специальной резьбой, которую почти невозможно получить другим способом (например, прямоугольную или спиральную резьбу треугольного профиля для ниппелей, ввинчиваемых в гибкие шланги). При этом качество поверхности литой резьбы, полученной этим способом, выше, чем механически нарезанной, поскольку рабочие поверхности пресс-формы еще шлифуют и полируют.

Отливки из чугуна и стали, титановых, алюминиевых, магниевых и медных сплавов получают на машинах с холодной камерой прессования, а из цинковых сплавов — преимущественно на машинах с горячей камерой прессования.

Отливки, полученные литьем под давлением, применяются во многих бытовых приборах (пылесосах, стиральных машинах, теле-

фонных аппаратах, светильниках, пишущих машинках), а также — в автомобильной промышленности и в производстве компьютеров. Так, отливки из цинковых сплавов широко используют в производстве товаров народного потребления (дверные и мебельные замки, зажимы застежек «молния», детали швейных машин и др.). В автомобильной промышленности литьем под давлением изготавливают детали приборов и декоративные детали типа ручек, решеток, корпусов фар и т. д. (рис. 1.39, а, б).

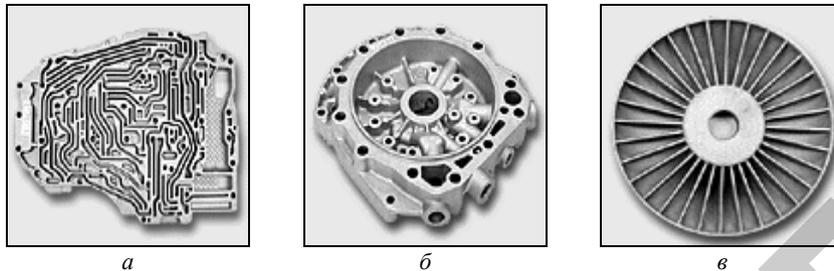


Рис. 1.39. Примеры отливок, полученных литьем под давлением: а — плата каналов переключения передач в автоматической КПП легкового автомобиля; б — промежуточная плата для крепления насоса; в — колесо гидромолота в системе охлаждения двигателя автомобиля КАМАЗ

Разновидностью способа литья под давлением является литье под низким давлением.

**Литье под низким давлением** — процесс получения отливок при заполнении формы расплавом и его кристаллизации под избыточным давлением до 0,1 МПа.

Литьем под низким давлением получают отливки в кокилях, песчано-глинистых и оболочковых формах, а также формах для литья по выплавляемым моделям. Этот способ литья значительно сокращает расход металла на литники, улучшает заполняемость форм, повышает плотность и герметичность отливок.

При литье под низким давлением (рис. 1.40) в обогреваемую камеру 1 устанавливают плавильный тигель 2 с расплавленным металлом, на верхнюю часть камеры устанавливают литейную форму 5. Пустота формы сообщается с тиглем с помощью металлопровода 3. Под действием сжатого воздуха или газа, поступающего в камеру из пневмосмесителя 4 под давлением 0,01...0,08 МПа,

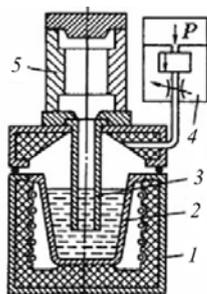


Рис. 1.40. Схема литья под низким давлением: 1 — обогреваемая камера; 2 — тигель; 3 — металлопровод; 4 — пневмосмеситель; 5 — литейная форма

расплав при температуре, которая на 100...150 °С выше температуры ликвидуса, из тигля поднимается по металлопроводу со скоростью 1,5...1,6 м/с и заполняет полость формы. После заполнения формы и необходимой выдержки для затвердевания отливки давление в камере сбрасывается, форма раскрывается и отливка извлекается.

Этот способ позволяет получать плотные тонкостенные отливки сложной конфигурации, без усадочной и газовой пористости и раковин, и применяется для изготовления сложных фасонных и особенно тонкостенных отливок корпусного типа из алюминиевых (рис. 1.39, в) и магниевых сплавов, получения отливок из меди (реже стали) массой до 50 кг в серийном и массовом производствах.

#### 4.5. Центробежное литье

**Центробежное литье** — способ литья, заключающийся в изготовлении отливок путем заливки расплавленного металла во вращающуюся форму, в которой ее заполнение и последующее охлаждение отливки происходит под действием центробежных сил. Центробежные силы отбрасывают жидкий металл к стенкам формы, где он затвердевает, образуя пустотелую отливку.

Центробежным литьем отливки изготовляют в металлических, песчаных, оболочковых формах и формах для литья по выплавляемым моделям.

Металлическая форма, используемая при центробежном литье, называется *изложницей*. Ее изготавливают из чугуна или стали. Толщина изложницы обычно в 1,5...2 раза превышает толщину отливки. В процессе литья изложницы снаружи охлаждают водой или воздухом. Перед работой изложницы нагревают до температуры 250...300 °С. После этого на рабочую поверхность изложницы наносят огнеупорные покрытия. Применение

покрытий повышает стойкость формы, снижает скорость охлаждения отливок и уменьшает вероятность образования в них трещин. В качестве покрытий используют краски или облицовки из формовочных материалов.

Формы приводят во вращение специальными машинами, называемыми центробежными. В зависимости от расположения оси вращения формы различают машины с горизонтальной и вертикальной осями вращения (рис. 1.41). Выбор центробежных машин зависит от соотношения размеров отливки. Так, если диаметр отливки значительно меньше ее длины (трубы, гильзы, втулки), то применяют формы с горизонтальной осью вращения, а если диаметр отливки больше, чем ее высота (колеса, шкивы, шестерни, фланцы), — с вертикальной осью.

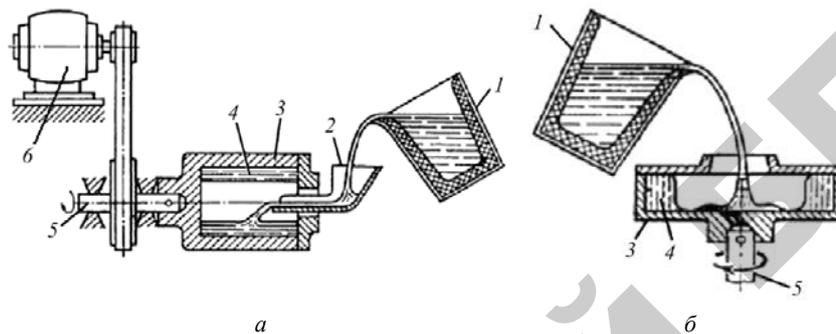


Рис. 1.41. Схема получения отливок способом центробежного литья на машинах: а — с горизонтальной осью вращения; б — с вертикальной осью вращения: 1 — ковш; 2 — желоб; 3 — изложница; 4 — отливка; 5 — шпиндель; 6 — электродвигатель

Машины с горизонтальной осью вращения (рис. 1.41, а) применяют для отливки чугунных и стальных труб, втулок и других видов отливок в виде тел вращения большой длины. Расплавленный металл из дозирочного ковша 1 по желобу 2 заливают в изложницу 3, укрепленную на шпинделе 5, приводимом во вращение электродвигателем 6. Для получения различных отливок частота вращения обычно составляет  $250 \dots 1\,500 \text{ мин}^{-1}$ . Изложница помещена в кожух, наполненный циркулирующей водой. После затвердевания готовую отливку 4 извлекают специальными приспособлениями.

Производительность центробежной машины с горизонтальной осью вращения составляет 40...50 труб в час (диаметр трубы составляет 200...300 мм, длина — 2...5 м).

В машинах с вертикальной осью вращения (рис. 1.41, б) металл из ковша 1 заливают в изложницу 3, укрепленную на шпинделе 5. Под действием центробежных сил металл прижимается к боковым стенкам формы и затвердевает, образуя отливку 4. В таких центробежных машинах получают отливки с разной толщиной стенки по высоте — большее сечение стенки получается в нижней части отливок.

*Преимуществами* центробежного литья являются следующие:

1) получение внутренних полостей цилиндрических заготовок без применения стержней;

2) высокий коэффициент использования металла ( $K_{ИМ} = 0,95$ ) за счет отсутствия или незначительных размеров литниковой системы;

3) получение мелкозернистой структуры за счет высокой скорости охлаждения отливки и повышение ее механических свойств;

4) увеличение плотности отливок за счет отсутствия пористости (усадочной и газовой);

5) возможность получения двухслойных заготовок, что достигается поочередной заливкой в форму различных сплавов (сталь и чугун, чугун и бронза и т. д.);

6) возможность получения тонкостенных отливок из сплавов с низкой жидкотекучестью.

Основными *недостатками* центробежного литья являются следующие:

1) склонность к сегрегации компонентов сплава (ликвация по плотности) во вращающихся формах, находящейся в прямой зависимости от скорости их вращения;

2) наличие усадочной пористости и неметаллических включений на внутренних поверхностях отливки;

3) возможность появления дефектов в виде продольных и поперечных трещин, газовых пузырей;

4) невозможность получения отверстий точного размера в отливке.

В настоящее время центробежным литьем изготавливают отливки из чугуна, стали, сплавов титана, алюминия и тяжелых металлов, сплавов магния и цинка (трубы, втулки, кольца, гильзы автомобильных и тракторных двигателей, буксы, подшипни-

ки качения, бандажки железнодорожных и трамвайных вагонов) (рис. 1.42). Масса отливок может составлять до 45 т, а толщина стенок — до 350 мм.



Рис. 1.42. Примеры отливок, полученных центробежным литьем: *а* — гильза цилиндров тракторного двигателя (ЧН15Д7); *б* — трубы (10Х18Н9Л); *в* — втулка с фланцем (ЛЦ40С)

#### 4.6. Другие способы литья

**Литье выжиманием** — способ литья, заключающийся в получении тонкостенных крупногабаритных отливок посредством свободной заливки расплава (через металлоприемник) в раскрытую форму с последующим заполнением им всей ее рабочей полости за счет сближения полуформ (рис. 1.43). Избыток расплава выжимается в приемный ковш.

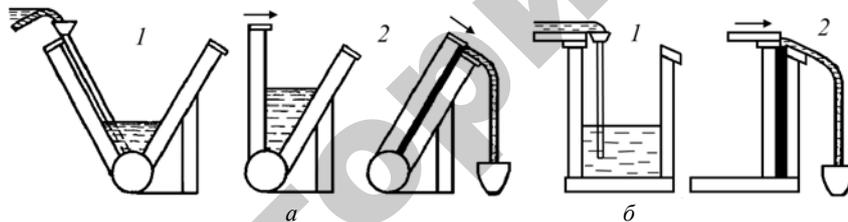


Рис. 1.43. Разновидности способа литья выжиманием: *а* — выжимание расплава поворотом подвижной полуформы; *б* — выжимание расплава плоскопараллельным перемещением подвижной полуформы; 1 — заливка сплава; 2 — сближение полуформ с выжиманием излишка металла

Процесс получения отливки реализуется двумя основными способами: поворотом подвижной полуформы вокруг жестко фиксированной оси (рис. 1.43, а) и плоскопараллельным сближением одной или обеих полуформ (рис. 1.43, б). При литье выжиманием используют металлические полуформы и песчаные стержни. Для повышения стойкости форм их перед заливкой покрывают защитными красками и нагревают до температуры 250 °С. Подогрев полуформ осуществляется нагревателями, размещенными внутри полуформ. Заливку алюминиевых и магниевых сплавов в форму проводят при температуре, превышающей температуру линии ликвидуса на 80...100 °С, а процесс выжимания начинают при температуре на 20...40 °С выше температуры линии ликвидуса.

Оптимальная скорость течения металла в форме (скорость подъема уровня металла), являющаяся важным параметром технологического процесса, составляет 0,3...0,7 м/с. Затвердевание отливки начинается в процессе движения расплава в форме и заканчивается соединением корочек металла, намороженных на стенках сближающихся полуформ. При соприкосновении полуформ возникает зона контакта поверхностей соединяемых корочек металла, которая представляет собой наиболее уязвимую дефектную область отливки.

*Преимуществами* способа литья выжиманием являются следующие:

- 1) возможность получения крупногабаритных тонкостенных отливок;
- 2) отсутствие литниковой системы;
- 3) возможность выжимания металла в форму в суспензионном состоянии (при температурах между температурами линий солидуса и ликвидуса).

К *недостаткам* способа литья выжиманием можно отнести следующие: пониженная точность размеров отливок (по сравнению с литьем в металлические формы) из-за неточной стыковки полуформ; низкий выход годного литья (25...50 %).

Литьем выжиманием изготавливают отливки, в основном, из алюминиевых (АК12, АК9ч, АК7ч, АК8л, АМг6лч) и магниевых (МЛ15, МЛ16) сплавов. Например, из алюминиевых сплавов получают крупногабаритные тонкостенные отливки деталей холодильников и теплообменных аппаратов размерами 1,0...2,5 м и толщиной стенок 1,5...5,0 мм.

**Литье с кристаллизацией под давлением** — специальный способ литья, заключающийся в получении отливок путем заливки металла в пресс-форму и последующем уплотнении пуансоном с помощью гидравлического пресса в процессе затвердевания металла.

По конструктивному исполнению матрицы пресс-форм подразделяются на неразъемные и разъемные (рис. 1.44).

Матрицу пресс-формы 1 до определенного уровня заполняют расплавом (посредством свободной заливки). Затем его выжимают в полость формы пуансоном 2 со скоростью 0,1...0,5 м/с (рис. 1.44, а). Заливку осуществляют при температуре, превышающей температуру линии ликвидуса сплава на 20...100 °С. С помощью пуансона окончательно оформляются контуры отливки и производится ее уплотнение (выдержка под давлением) до полного затвердевания. В процессе литья с кристаллизацией под давлением кристаллизующийся металл может дополнительно подвергаться воздействию вибрации и ультразвука. В неразъемной пресс-форме (рис. 1.44, в) отливка удаляется с помощью выталкивателя 3.

К *преимуществам* метода литья с кристаллизацией под давлением можно отнести следующие:

- 1) получение плотных отливок с мелкозернистой структурой, с отсутствием пористости (газовой и усадочной) из литейных и деформируемых сплавов с широким интервалом температур кристаллизации;
- 2) получение отливок с механическими свойствами, приближающимися к свойствам поковок (по сравнению с литьем в песчано-глинистые формы прочность отливок повышается в 1,5 раза, пластичность и ударная вязкость — в 2...4 раза);
- 3) небольшие припуски на последующую механическую обработку;
- 4) высокую производительность технологического процесса;
- 5) отсутствие литниковой системы;
- 6) большой процент выхода годных отливок (95 %).

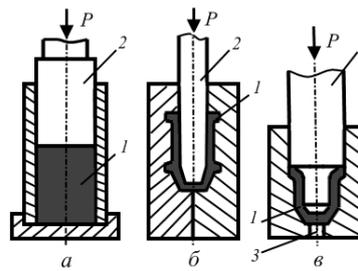


Рис. 1.44. Схемы литья с кристаллизацией под давлением:  
а, б — в разъемных формах;  
в — в неразъемной форме

Основными *недостатками* этого метода являются следующие: большая трудоемкость изготовления пресс-форм и их высокая стоимость.

Литьем с кристаллизацией под давлением получают заготовки на основе цветных металлов (алюминия, магния, меди, цинка), а также стали и чугуна различной конфигурации (простые и сложные). При этом могут быть использованы литейные и деформируемые сплавы. Последние имеют широкий интервал температур кристаллизации и склонны в связи с этим к образованию усадочной пористости и горячих трещин. Данным способом литья получают слитки диаметром 30...600 мм, а также отливки с толщиной стенок от 1 до 100 мм и массой до 300 кг.

**Непрерывное литье** — способ литья, заключающийся в получении длиномерных отливок посредством свободной непрерывной заливки расплава в водоохлаждаемую форму (кристаллизатор) и вытягивания из нее закристаллизовавшейся части отливки. Если по времени подачи металла или его массе накладываются ограничения, то данный способ называют *полунепрерывным литьем*.

Исходя из направления вытяжки заготовки, непрерывное (полунепрерывное) литье подразделяется на горизонтальное и вертикальное. При горизонтальном литье металл отливки меньше подвержен окислению и загрязнению шлаковыми включениями, поскольку он сначала попадает в специальный металлоприемник (например, в разливочную печь), а из него в кристаллизатор. Следует отметить, что вертикальное литье является более эффективным способом получения полых заготовок.

В зависимости от материала рабочей полости литейные формы (кристаллизаторы) подразделяют на металлические (из меди, алюминия, стали) или графитовые.

Внутренняя рабочая полость кристаллизатора, непосредственно контактирующая с расплавом, охлаждается водой. Эта полость формирует в соответствии с конфигурацией своего поперечного сечения профиль будущей отливки. При выборе протяженного размера кристаллизатора учитываются теплопроводность и технологические свойства материала отливки, а также ее площадь поперечного сечения. Так, для литья сплавов на основе алюминия и меди используют кристаллизаторы длиной до 300 мм, а для сталей и чугунов — 900...1 500 мм.

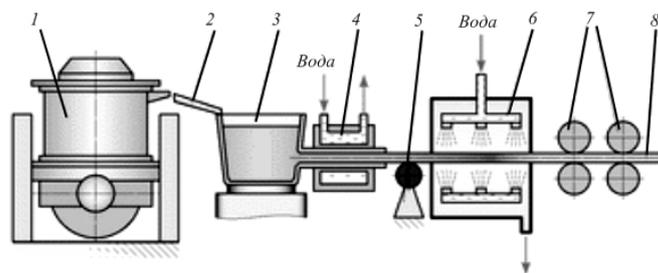


Рис. 1.45. Схема установки непрерывного горизонтального литья:  
 1 — плавильная печь; 2 — приемный лоток; 3 — печь выдержки;  
 4 — водоохлаждаемый кристаллизатор; 5 — стойка; 6 — панель охлаждения;  
 7 — ролики вытяжные; 8 — заготовка

На рисунке 1.45 представлена схема установки для горизонтального литья. Расплав в водоохлаждаемый кристаллизатор 4 поступает через печь выдержки 3 из плавильной печи 1. Затвердевающая часть заготовки, проходя через панель охлаждения 6, вытягивается (обычно в прерывистом режиме) с помощью роликов 7. При этом пилой (или резаком) заготовку 8 периодически разделяют на части определенного размера. В процессе непрерывного литья чугуна скорость вытяжки (при ее продолжительности 1...10 с) колеблется в пределах 3,3...33 мм/с. В данном случае продолжительность остановки (2...20 с), в среднем, значительно превышает время вытягивания. В отличие от непрерывного литья полунепрерывное литье основано на получении отливки за один цикл литья с перерывом в подаче расплава, необходимым для подготовки следующего цикла литья.

*Преимуществами* способа непрерывного литья являются следующие:

- 1) неограниченность длины отливки;
- 2) однородность свойств отливки по длине;
- 3) повышенная плотность металла;
- 4) направленное затвердевание металла;
- 5) отсутствие литниковой системы;
- 6) большой процент выхода годного металла;
- 7) точность и повышенная чистота поверхности отливки;
- 8) отсутствие операций выбивки форм, обрубки и очистки отливок;
- 9) относительно невысокая стоимость литейных форм;
- 10) повышенная производительность труда.

К недостаткам данного способа литья можно отнести следующие: возможность изготовления отливок только простой конфигурации и ограниченность их номенклатуры.

Методом непрерывного или полунепрерывного литья изготавливают трубы с широким диапазоном размеров (диаметром до 1 м), втулки для гильз дизельных двигателей, заготовки для гаек, шестерен, прокатных валков и др.

#### 4.7. Сравнительная характеристика различных способов литья

Специальные способы литья относятся к прогрессивным технологическим процессам, позволяющим экономить материальные, энергетические и трудовые ресурсы и получать отливки с требуемой конфигурацией, точными размерами и чистотой поверхности более высокой, чем при применении песчано-глинистых форм. Механизация и автоматизация технологических процессов изготовления отливок специальными методами обеспечивает хорошее качество изделий, высокую производительность труда и снижает их себестоимость. Каждый специальный способ литья имеет особенности, определяющие область его применения и экономическую эффективность, и обладает своими достоинствами и недостатками.

При выборе способа литья руководствуются предъявляемыми к отливкам требованиями, которые можно условно подразделить на общие, специальные и экономические.

**Общие требования** регламентируют размерную точность отливки, качество ее поверхности (шероховатость), механические свойства и качество литого металла.

Так, *размерная точность* отливки представляет собой степень соответствия фактических и указанных в чертеже размеров. Согласно ГОСТ 26645-85 предусмотрены 22 класса размерной точности (1...16, в том числе классы 3т, 5т, 7т, 9т, 11т, 13т). Более высокому числовому значению класса размерной точности соответствуют и большие допуски на размеры отливки, т. е. тем меньшей точностью характеризуется отливка.

Качество поверхности отливок оценивается, прежде всего, степенью точности поверхности и зависит от ее шероховатости (ГОСТ 26645-85). *Шероховатость* поверхности чаще всего оценивается по номинальным

значениям следующих параметров (мкм): среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  (среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля) и высоты неровностей профиля по десяти точкам  $Rz$  (среднее значение абсолютных размеров пяти наибольших выступов и пяти наибольших впадин профиля). На шероховатость поверхности оказывают влияние размер и конфигурация (сложность формы) отливки, состав сплава и способ литья.

К *механическим свойствам*, определяющим работоспособность отливки в данных условиях эксплуатации, относятся требуемые значения твердости, прочности, пластичности, ударной вязкости и др. Высокими механическими свойствами обладают отливки с равномерной мелкозернистой структурой, которая достигается литьем в кокиль или под давлением, центробежным литьем и др.

*Качество литого металла* определяется литейными свойствами сплавов и характеризуется отсутствием раковин (усадочных и газовых) и пористости, ликвации компонентов сплава в объеме отливки, горячих и холодных трещин и коробления в отливках.

**Специальные требования** к отливкам вытекают из их функционального назначения и условий эксплуатации. К этим требованиям относится обеспечение: *герметичности* в условиях низкого и сверхвысокого вакуума, а также повышенного давления газа или жидкости, *коррозионной стойкости* в агрессивных средах, *термостойкости* (способности не разрушаться под действием циклических нагрузок, вызванных многократным нагревом и охлаждением), *износостойкости* при трении качением или скольжением (со смазкой и без нее), *стабильности размеров* (в условиях действия знакопеременного нагружения или повышенных температур). Реализация данных специальных требований к отливкам достигается выбором состава литейного сплава, оптимального метода литья и последующей обработки (механической и термической).

**Экономические требования**, предъявляемые к конкретному методу литья, определяются технико-экономическими показателями, к которым относятся *коэффициент использования металла*, *относительная себестоимость отливок*, *экономически оправданная серийность*. В этом случае критериями выбора рационального способа литья являются экономия используемых материалов, отсутствие необходимости в механической обработке, обеспечение минимальной себестоимости отливки и др.

Сравнительная характеристика различных способов литья представлена в таблице 1.12.

Таблица 1.12

Сравнительная характеристика различных способов литья

Характеристики отливки		Способ литья					
		ЛПФ	ЛОФ	ЛВМ	ЛК	ЛПД	ЦЛ
Материал		ст, ч, цс				цс	ст, ч, цс
Максимальная масса, т		200	0,15		7 (ч), 4 (ст), 0,5 (цс)	0,1	45
Максимальный размер, м		неогр.	1,5	1,0	2,0	1,2	6,0
Толщина, мм	min	3,0	2,0	0,5	3,0	5,0	4,0
	max	неогр.	12,0	6,0	100	6,0	2,0
Класс размерной точности		6...14	4...11	3...8	4...11	3...7	6...15
Шероховатость поверхности, Rz, мкм		320...80	160...40	80...20	160...40	40...10	320...80
Коэффициент использования металла, %		60...70	80...95	90...95	75...80	90...95	70...90
Относительная себестоимость		1,0	1,5...2,0	2,5...3,0	1,2...1,5	1,8...2,0	0,6...0,7
Экономически оправданная серийность, шт./год		неогр.	200...500	1 000	400...800	1 000	100...1 000
<p>Примечание: ЛПФ — литье в песчано-глинистые формы, ЛОФ — литье в оболочковые формы, ЛВМ — литье по выплавляемым моделям, ЛК — литье в кокиль, ЛПД — литье под давлением, ЦЛ — центробежное литье; ст — сталь, ч — чугун, цс — цветные сплавы; неогр. — неограниченно.</p>							

### Вопросы для самоконтроля

1. Сущность процесса литья по выплавляемым моделям.
2. Сущность процесса литья в оболочковые формы.
3. Сущность процесса литья в кокиль.
4. Сущность процесса литья под давлением.
5. Сущность процесса центробежного литья.
6. Сущность процесса литья выжиманием.
7. Сущность процесса литья с кристаллизацией под давлением.
8. Сущность процесса непрерывного литья.
9. Сравнительная характеристика различных способов литья.

## МАТЕРИАЛЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

### Лабораторная работа 1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ

**Цель работы.** Ознакомиться с исходными материалами и процессами приготовления формовочных смесей, изучить их свойства и освоить методы определения газопроницаемости и предела прочности при сжатии смесей.

**Подготовка студента к занятию.** Изучить следующие вопросы теоретического материала:

1. Классификация и назначение материалов (основных и вспомогательных), используемых для приготовления формовочных смесей.

2. Классификация формовочных смесей по назначению.

3. Механические, технологические и физические свойства формовочных и стержневых смесей.

**Средства обучения. Оборудование и инструменты:** лабораторные бегуны, лабораторный копер, бункеры для смесей, прибор для определения газопроницаемости, прибор для определения прочности при сжатии образцов во влажном состоянии, мензурка, весы с разновесами, металлическая линейка. **Материалы:** сухой кварцевый песок, бентонитовая глина, вода, формовочная песчано-глинистая смесь.

#### Порядок выполнения лабораторной работы

##### 1. Приготовление формовочных смесей.

Приготовление формовочной смеси — процесс получения однородного многокомпонентного соединения формовочных материалов различного назначения.

Приготовление формовочных смесей заключается в перемешивании, увлажнении, вылеживании и разрыхлении предварительно подготовленных формовочных материалов. Их приготавливают перемешиванием компонентов смеси с применением различных типов смесителей. В основном, для приготовления смесей используют специализированные смесители: катковые (бегуны) и шнековые (рис. 1.46).

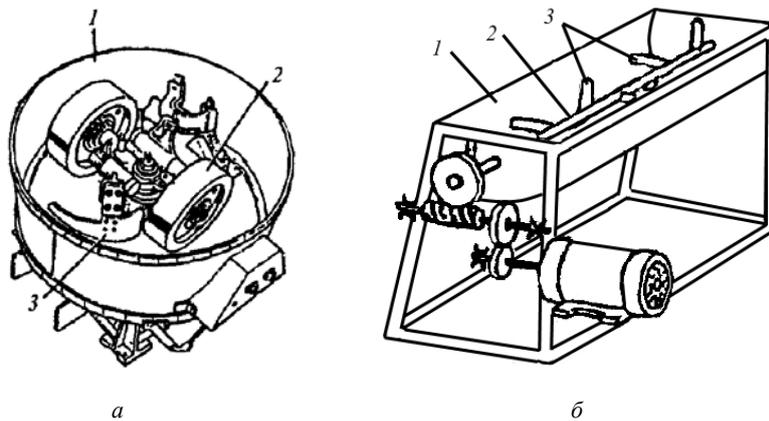


Рис. 1.46. Смесители для приготовления формовочных смесей: *а* — катковый (бегуны) (1 — чаша; 2 — каток; 3 — плужок); *б* — шнековый (1 — емкость; 2 — вал перемешивающего устройства; 3 — лопасти)

Сущность процесса перемешивания состоит в получении из песка, глины и воды однородной смеси, в которой каждая частица песка должна быть покрыта тонким равномерным слоем влажной глины, с помощью которой происходит «склеивание» частиц песка между собой. Одновременно со смешиванием осуществляется перетирание частиц песка без их разрушения. При такой обработке смесь будет обладать наилучшими свойствами при наименьшем расходе глины.

Увлажненная формовочная смесь выдерживается (2...3 ч) для выравнивания влажности по всему объему смеси.

Для проведения испытаний студенты готовят смесь следующего состава: 0,2 кг глины и 1,8 кг сухого кварцевого песка, которую перемешивают в лабораторных бегунах в течение 2-х минут. Затем добавляют воду (2...6 %). В случае использования готовой формовочной смеси ее перемешивают в бегунах и увлажняют, добавляя указанное количество воды (2...6 %).

## 2. Определение свойств формовочных смесей.

Изучение основных свойств формовочных смесей (газопроницаемости и прочности) проводится по приведенным методикам.

### *Методика определения газопроницаемости.*

Определение газопроницаемости выполняется путем измерения времени прохождения известного объема воздуха под постоянным

давлением через стандартный образец или ускоренным методом — по перепаду давлений на образце (ГОСТ 234095-78).

Для проведения испытаний применяют стандартный прибор, показанный на рисунке 1.47.

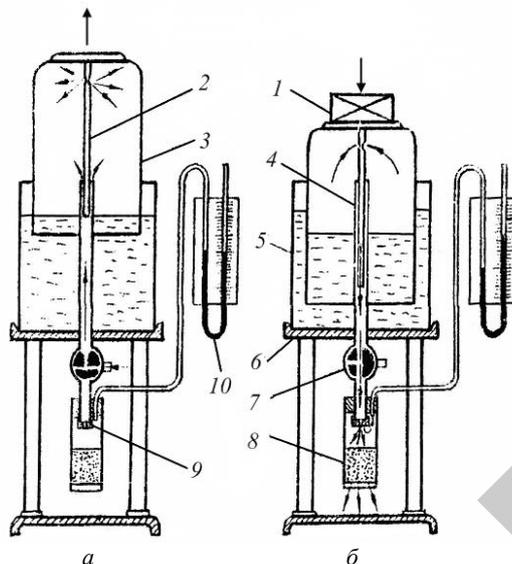


Рис. 1.47. Схема прибора для определения газопроницаемости формовочных смесей: а — до начала испытания; б — в процессе испытания

На чугунном основании *б* укреплен бак *5* с трубкой *4* (рис. 1.47, *а*). Внутри бака помещается колокол *3* с трубкой *2*. При опускании колокола в бак трубка *2* входит в трубку *4* (рис. 1.47, *б*). Сверху колокола *3* закреплен груз *1*, утяжеляющий колокол. До начала испытаний в бак *5* наливают воду и в нее опускают колокол *3*. Находящийся в колоколе воздух выходит через трубку *4*, трехходовой кран *7* и воздухопровод с калиброванным ниппелем *9*. Тонкие отверстия ниппеля обеспечивают определенный минутный расход воздуха, что исключает необходимость пропускания точного объема воздуха и определения времени его прохождения. Кран *7* предназначен для регулирования течения воздуха через воздухопровод и гильзу с образцом *8*. Полость, расположенная перед образцом, соединена с воздухопроводом и манометром *10*.

При испытаниях принято, что проходящий через образец объем воздуха равен  $V = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , а его давление перед образцом составляет  $\Delta P = 980,7 \text{ Па}$  (10 мм вод. ст.) и обеспечивается подбором груза на колоколе. Толщина образца  $h = 50 \pm 0,8 \text{ мм}$ , диаметр  $D = 50 \pm 0,02 \text{ мм}$ .

Для определения газопроницаемости и прочности формовочной смеси изготавливают стандартные образцы. Испытуемая смесь массой  $165 \pm 15 \text{ г}$  засыпается в металлическую гильзу с вставным дном, имеющую внутренний диаметр  $50 \pm 0,2 \text{ мм}$  и высоту 119 мм.

Металлическая гильза с засыпанной в нее навеской формовочной смеси для уплотнения образца переносится на лабораторный копер. Поворачивая ручку эксцентрика, поднимают груз; при дальнейшем повороте рукоятки груз соскакивает с эксцентрика и, падая, ударяется о нижний упор, закрепленный на стержне. Удар груза через стержень и боек передается навеске формовочной смеси, находящейся в гильзе, и уплотняет ее. Конструкция копра обеспечивает постоянство высоты подъема груза (50 мм) во время последующих ударов.

Для стандартного уплотнения образца должно быть сделано три удара грузом, масса которого равняется 6 350 г. При соблюдении перечисленных требований получают образец, высота которого составляет  $50 \pm 0,8 \text{ мм}$ . Высота образца контролируется с помощью горизонтальных рисок на стойке копра.

После уплотнения образца формовочной смеси он вместе с гильзой  $\delta$  снимается с копра и переносится на прибор для испытания на газопроницаемость.

При ускоренном методе определения газопроницаемости достаточно зафиксировать показание водяного манометра, а газопроницаемость определяется по специальной таблице. Газопроницаемость, определенная нормальным или ускоренным методом, выражается числом без указания размерности (ГОСТ 234095-78).

Студенты изготавливают стандартные образцы формовочной смеси в металлической гильзе на лабораторном копере в соответствии с двух-, трех-, четырехкратным уплотнением. Испытания на газопроницаемость ускоренным методом по описанной выше методике для каждого вида уплотнения проводят на трех образцах. Истинные значения принимают как среднее арифметическое.

### Методика определения прочности.

Определение предела прочности влажных образцов формовочной смеси при сжатии производится на специальном приборе посредством приложения к плоским торцам образца вдоль его оси равномерно возрастающей нагрузки (ГОСТ 234097-78). Рычажный прибор (рис. 1.48) представляет собой станину 1 с двумя подшипниками 2. В них укреплен ходовой винт, при вращении которого передвигается каретка 3 с указателем. На верхний ролик каретки опирается градуированный рычаг 5. Один конец рычага шарнирно связан с вертикальной скалкой 6, на другом конце рычага помещен груз 4. На скалке укреплены лоток и площадка 7 для установки испытуемого образца 10. Около вертикальной скалки прибора к станине прикреплена траверса 9. Вверху траверсы имеет винт с верхней упорной площадкой 8.

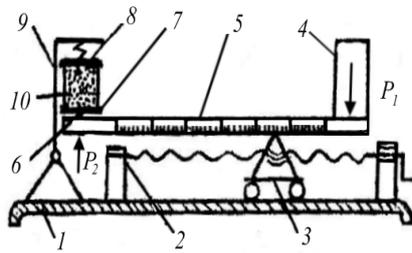


Рис. 1.48. Схема прибора для определения прочности формовочной смеси

Прибор устанавливается на лабораторном столе. Перед производством испытаний его проверяют на правильность расположения груза на рычаге с нанесенной на него градуировочной шкалой.

После определения газопроницаемости образец выдавливают из гильзы и переносят на рычажный прибор. Образец закрепляют между площадками прибора и производят вращение ходового винта со скоростью не более 40 об/мин. При перемещении каретки от исходного положения, постепенно увеличивая нагрузку  $P_1$ , сжимающую образец, изменяется соотношение длин плеч рычага. В момент разрушения образца вращение ходового винта прекращают и по указателю фиксируют предел прочности образца в кгс/см<sup>2</sup>.

Определение предела прочности на сжатие образцов формовочной смеси при различной степени уплотнения (2, 3, 4 удара груза) производится на приборе в соответствии с описанной выше методикой. Для этого образцы после определения газопроницаемости извлекаются из гильзы при помощи выталкивателя и помещаются на специальной площадке прибора.

### 3. Оформление результатов работы.

Полученные экспериментальные данные газопроницаемости и предела прочности образцов студенты заносят в таблицу 1.13.

Таблица 1.13

Влияние уплотняемости формовочной смеси на ее газопроницаемость и прочность

Количество ударов на копре	Газопроницаемость				Предел прочности на сжатие, кгс/см <sup>2</sup>			
	1	2	3	Среднее	1	2	3	Среднее
2								
3								
4								

По результатам экспериментальных данных студенты строят графики зависимостей газопроницаемости и предела прочности от степени уплотненности формовочной смеси и делают соответствующие выводы.

#### Вопросы для текущего контроля (к защите лабораторной работы)

1. Состав формовочных смесей.
2. Классификация формовочных материалов.
3. Классификация формовочных смесей по назначению.
4. Свойства формовочных смесей.
5. Чем различаются требования к свойствам формовочных и стержневых смесей?
6. Чем различаются требования к свойствам облицовочной, наполнительной и единой формовочных смесей?

## Лабораторная работа 2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ РАЗОВОЙ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОЙ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ

**Цель работы.** Ознакомиться с технологическим процессом изготовления разовой песчано-глинистой формы в парных опоках по разъемной модели.

**Подготовка студента к занятию.** Изучить следующие вопросы теоретического материала:

1. Литейная оснастка, используемая для изготовления песчано-глинистых форм при ручной формовке: модельный комплект (модели отливки и элементов литниковой системы, модельные плиты, стержневые ящики, формующие, контрольные и сборочные шаблоны).

2. Технология изготовления разовых песчано-глинистых форм ручной формовкой в парных опоках по разъемной модели.

**Средства обучения.** *Оборудование и инструменты:* лабораторные бегуны, весы, емкость для хранения формовочной смеси и компонентов для ее изготовления, модельный комплект (парные опоки, модельная плита, модели отливки и литниковой системы), инструмент для ручной формовки (трамбовка, формовочный нож, формовочное шило (душник), сито). *Материалы:* кварцевый песок, формовочная глина, отработанная формовочная смесь, вода.

### Порядок выполнения лабораторной работы

#### 1. Приготовление песчано-глинистой смеси.

Студенты готовят формовочную смесь заданного состава: сухой кварцевый песок — 1 900 г (95 %), формовочная глина — 100 г (5 %), вода — 80 г (4 % от массы смеси песка и глины). Можно смешать вновь приготовленную смесь с ранее отработанной.

#### 2. Изготовление разовой литейной формы.

Студенты изготавливают песчано-глинистую форму в парных опоках по разъемной модели в следующей последовательности.

Процесс формовки (рис. 1.49) начинают с изготовления нижней полуформы. Набивку нижней опоки 3 (рис. 1.49, а) начинают с размещения на подмодельном щитке нижней части модели 2. Затем на подмодельный щиток устанавливается перевернутая нижняя опока 3.

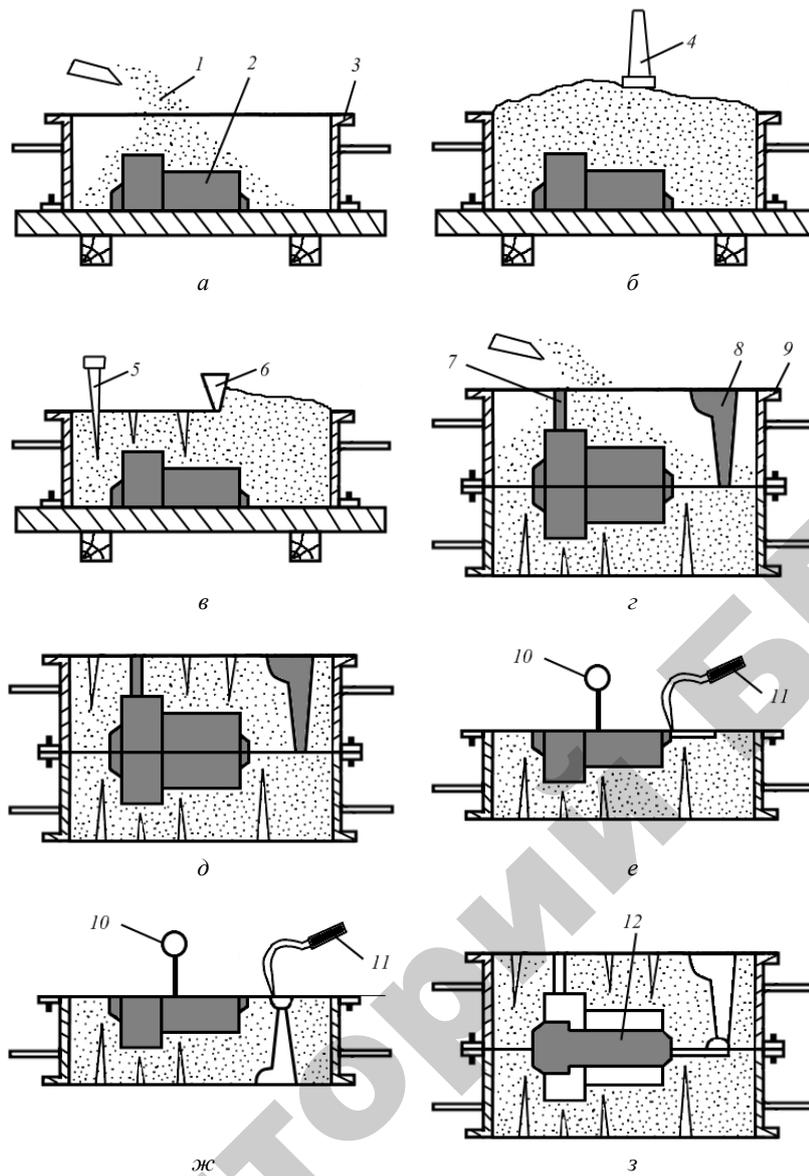


Рис. 1.49. Технологический процесс формовки

На поверхность модели наносится формовочная смесь 1 и уплотняется вначале острым наконечником трамбовки 4. Формовочная смесь засыпается послойно, и после уплотнения смеси вокруг модели последующие слои, заполняющие форму, уплотняются плоским наконечником трамбовки 4 (рис. 1.49, б). Излишек смеси сверху опоки срезают формовочной линейкой 6. Для получения вентиляционных каналов формовочных шилом (душником) 5 делают наколы, не доходящие на 15...20 мм до модели (рис. 1.49, в).

Нижнюю полуформу поворачивают на 180° и ставят на ровную поверхность (рис. 1.49, г). При изготовлении верхней полуформы производят набивку формовочной смесью верхней опоки. Для чего устанавливают на нижнюю полуформу верхнюю часть модели и накрывают ее верхней опокой 9. После этого в верхней опоке размещают модели элементов литниковой системы: стояка 8 и выпора 7. После уплотнения смеси вентиляционные каналы накалывают душником (рис. 1.49, д).

Для извлечения модели форму разбирают, предварительно удалив стояк и выпор, полуформы устанавливают плоскостью разъема вверх (рис. 1.49, е, ж). Специальным ножом 11 вырезают питатели в нижней полуформе (рис. 1.49, е) и шлакоулавнитель в верхней полуформе (рис. 1.49, ж). Предварительно растолкав (расшатав), полумодели извлекают из полуформ с помощью подъемника 10. Перед сборкой полуформы подсушивают и производят заделку дефектов.

Сборка форм производится после припыла поверхности полуформ для уменьшения пригара графитом, тальком или пылевидным кварцевым песком.

Изготовленный в стержневом ящике стержень 12 устанавливают в нижнюю полуформу. Верхнюю полуформу по фиксирующим штырям устанавливают на нижнюю (рис. 1.49, з). Полуформы скрепляют клином.

### **3. Оформление результатов работы.**

Привести эскиз детали, а также эскизы модели и стержня, используемые при получении разовой песчано-глинистой формы.

Описать этапы изготовления песчано-глинистой формы в парных опоках по разъемной модели.

Привести эскиз формы в сборе.

**Вопросы для текущего контроля**  
(к защите лабораторной работы)

1. Отличия литой детали от отливки.
2. Литниковая система и ее основные элементы.
3. Состав модельного комплекта.
4. Модель и ее отличия от детали.
5. Технологический процесс изготовления разовой литейной формы по разъемной модели.

### Лабораторная работа 3. АНАЛИЗ СВОЙСТВ ОТЛИВОК, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ ЛИТЬЯ

**Цель работы.** Ознакомиться с технологиями изготовления отливок в песчано-глинистой форме и кокиле. Изучить влияние способа литья на свойства отливок.

**Подготовка студента к занятию.** Изучить следующие вопросы теоретического материала:

1. Технологические основы специальных способов литья.
2. Особенности свойств отливок, получаемых различными способами.
3. Требования, предъявляемые к отливкам, при выборе способа литья.
4. Технология получения отливок в песчано-глинистых формах.
5. Технология получения отливок в кокиле.

**Средства обучения.** *Оборудование и инструменты:* лабораторные бегуны, печь для плавки металла, тигель, прибор для измерения твердости по Бринеллю, весы, емкости для хранения формовочной смеси и компонентов для ее изготовления, заливочный ковш, кокиль, модельный комплект (парные опоки, модельная плита, модели отливки и литниковой системы), инструмент для ручной формовки (трамбовка, формовочный нож, формовочное шило, сито), ложка для снятия шлака, клещи, оборудование для приготовления микрошлифов, металлографический микроскоп. *Материалы:* кварцевый песок, формовочная глина, отработанная формовочная смесь, вода, алюминиевый сплав, флюс (поваренная соль), смазка для кокиля, травитель для алюминия, спирт, абразивная бумага, фетр, оксид хрома.

#### Порядок выполнения лабораторной работы

##### 1. Изготовление песчано-глинистой формы.

Приготовить несколько замесов формовочной смеси заданного состава: сухой кварцевый песок — 1 900 г (95 %), формовочная глина — 100 г (5 %), вода — 80 г (4 % от массы смеси песка и глины). Можно смешать вновь приготовленную смесь с ранее отработанной.

Порядок изготовления песчано-глинистой формы по модельной плите представлен на рисунке 1.50.

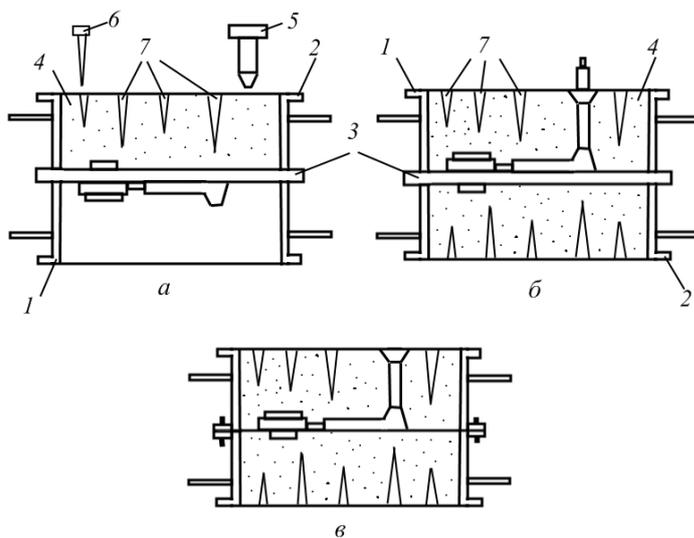


Рис. 1.50. Порядок изготовления песчано-глинистой формы: 1 — опока верх; 2 — опока низ; 3 — модельная плита; 4 — формовочная смесь; 5 — трамбовка; 6 — формовочное шило; 7 — вентиляционные каналы

Устанавливаем на стол верхнюю опоку формы 1, на которую ставится модельная плита 3, перевернутая литниковой системой вниз (рис. 1.50, а). На модельную плиту устанавливается нижняя опока формы 2, куда (примерно на половину ее высоты) засыпается предварительно приготовленная формовочная смесь. Засыпанная смесь 4 уплотняется во всем объеме опоки ударами острого конца трамбовки 5. После уплотнения засыпанной части формовочной смеси опока заполняется формовочной смесью с верхом и уплотняется по всей площади плоским концом трамбовки. Избыток смеси срезается по всей площади опоки формовочным ножом и с помощью формовочного шила 6 накалывается 5...6 вентиляционных каналов.

Форма переворачивается (рис. 1.50, б) на 180° и верхняя опока так же, как и нижняя, набивается формовочной смесью.

После набивки верхней опоки форма разбирается, а модельная плита, модели отливки и литниковой системы извлекаются из формы. Затем форма собирается вновь и устанавливается для заливки жидкого металла (рис. 1.50, в).

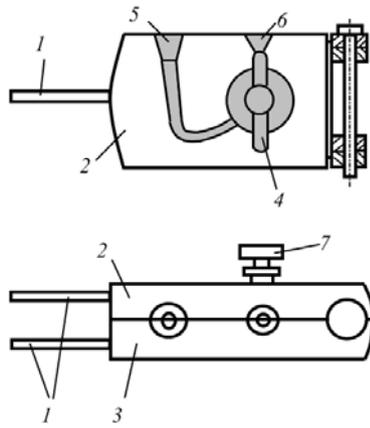


Рис. 1.51. Кокиль: 1 — ручки;  
2, 3 — полуформы; 4 — полость;  
5 — заливочная воронка;  
6 — выпор; 7 — толкатель

## 2. Подготовка к заливке кокиля.

Кокиль (рис. 1.51) раскрывается, очищается от грязи, а поверхности кокиля, непосредственно контактирующие с расплавленным металлом (полость отливки и литниковая система), смазываются специальной смазкой. Смазка наносится кистью тонким слоем и содержит 50 % масла веретенного и 50 % порошка графита. После нанесения смазки левая 2 и правая 3 полуформы соединяются. На рукоятки 1 надевается специальное кольцо, не позволяющее раскрыться полуформам во время заливки. Собранный кокиль устанавливается под заливку воронкой

5 и выпором 6 вверх. Перед заливкой рекомендуется произвести предварительный подогрев кокиля до температуры 200 °С.

## 3. Подготовка расплавленного металла и заливка формы.

Отливка изготавливается из силумина. Плавка сплава производится в электропечи сопротивления, разогретой до температуры 760 °С. Перед плавкой тигель заполняется шихтой с добавкой соли NaCl (0,2 % от массы расплавленного металла). Соль добавляется для связывания (шлакования) оксидных пленок. Шлак перед заливкой снимается с поверхности ковша шлаковой ложкой. Заливка форм производится при температуре расплава 700...750 °С. Остаток металла в ковше выливается в тигель.

## 4. Охлаждение и извлечение отливки.

После заливки отливка охлаждается в форме (15...20 мин).

Выбивка песчаной формы производится в ящике с формовочной смесью. Из раскрытого кокиля отливка извлекается ударом молотка по толкателю 7.

## 5. Сравнение отливок, полученных при литье в кокиль и песчано-глинистую форму.

Студенты измеряют твердость материала полученных отливок, шероховатость их поверхности и определяют класс размерной точности.

Из полученных отливок студенты приготавливают шлифы и проводят их микроструктурный анализ.

#### **6. Оформление результатов работы.**

При изучении микроструктур студенты их зарисовывают и оценивают размер зерна.

Результаты проведенных измерений твердости материала отливок, шероховатости поверхности, класса размерной точности студенты заносят в таблицу 1.14.

Таблица 1.14

Сравнительная характеристика отливок, полученных при литье в кокиль и песчано-глинистую форму

Способ литья	Характеристики отливки		
	Твердость, НВ	Шероховатость поверхности (ГОСТ 26645-85), мкм	Класс размерной точности (ГОСТ 26645-85)
В кокиль			
В песчано-глинистую форму			

По результатам работы сделать выводы о влиянии материала литейной формы на свойства отливки.

#### **Вопросы для текущего контроля** (к защите лабораторной работы)

1. Сущность процесса литья в кокиль.
2. Общие, специальные и экономические требования, предъявляемыми к отливкам, полученным различными способами литья.
3. Преимущества и недостатки литья в кокиль по сравнению литьем в песчано-глинистые формы.

## МАТЕРИАЛЫ К УПРАВЛЯЕМОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

### Тема «ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАЗОВОЙ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОЙ ФОРМЫ ДЛЯ КОНКРЕТНОЙ ДЕТАЛИ»

В соответствии с индивидуальным заданием (рис. 1.52) студенты проектируют разовую песчано-глинистую форму для получения конкретной детали.

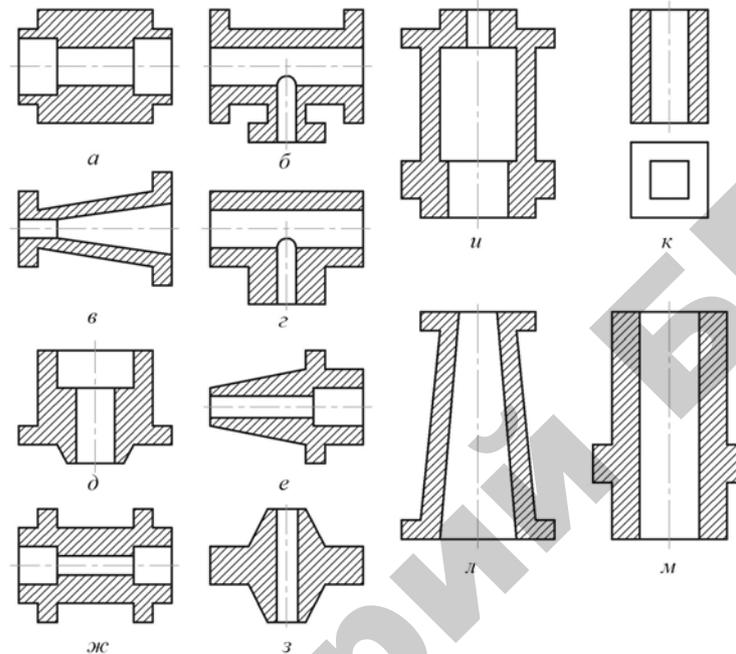
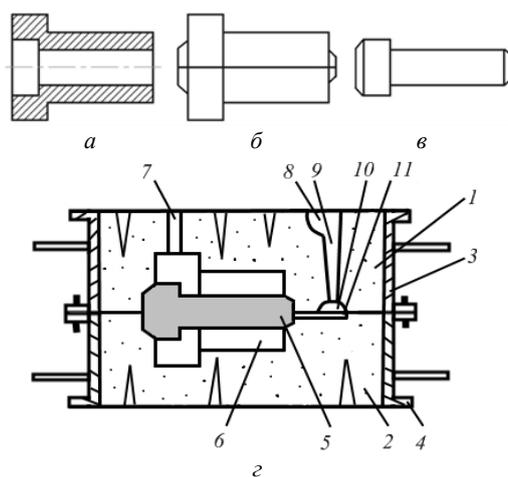


Рис. 1.52. Варианты индивидуальных заданий

При оформлении работы студент приводит эскизы:

- 1) детали;
- 2) модели;
- 3) стержня;
- 4) песчано-глинистой формы в сборе с обозначением элементов формы и элементов литниковой системы.

Пример выполнения задания представлен на рисунке 1.53.



*Рис. 1.53.* Пример выполнения индивидуального задания по проектированию разовой песчано-глинистой формы по разъемной модели: *а* — эскиз детали; *б* — эскиз модели; *в* — эскиз стержня; *г* — эскиз формы в сборе; *1, 2* — верхняя и нижняя полуформы; *3, 4* — верхняя и нижняя опоки; *5* — стержень; *6* — полость литейной формы; *7* — выпор; *8* — литниковая чаша; *9* — стояк; *10* — шлакоуловитель; *11* — питатель

## РАЗНОУРОВНЕВЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО МОДУЛЮ 1

Билет для разноуровневого контроля знаний по модулю имеет следующую структуру:

1) уровень I (репродуктивный): компьютерное тестирование (6 тестовых заданий). Правильный ответ оценивается в 0,5 балла.

2) уровень II (продуктивный): 2 вопроса. В зависимости от полноты и качества ответа студента оценка равняется 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 балла за каждый вопрос.

3) уровень III (творческий): 1 вопрос повышенной трудности. Максимальная оценка — 3 балла.

### Уровень I (репродуктивный)

1. Сплавом железа с углеродом ( $C < 2,14\%$ ) является:

- 1) техническое железо;
- 2) сталь;
- 3) чугун.

2. Сплавом железа с углеродом ( $C > 2,14\%$ ) является:

- 1) техническое железо;
- 2) сталь;
- 3) чугун.

3. В качестве флюса в доменной печи используется:

- 1) железная руда;
- 2) известняк;
- 3)  $SiO_2$ .

4. Раскислителями при получении полуспокойной стали являются:

- 1) ферромарганец;
- 2) ферромарганец и алюминий;
- 3) ферромарганец, ферросилиций и Al.

5. Компонентом шихты для удаления из доменной печи тугоплавкой пустой породы и золы топлива является:

- 1) флюс;
- 2) железная руда;
- 3) марганцевая руда.

6. Компонентом шихты для получения в доменной печи шлака с необходимым химическим составом и физическими свойствами является:

- 1) руда;
- 2) топливо;
- 3) флюс.

7. Агрегатом для выплавки чугуна является:

- 1) мартеновская печь;
- 2) доменная печь;
- 3) кислородный конвертер.

8. Исходными материалами для получения чугуна являются:

- 1) руда, скрап, топливо;

- 2) руда, топливо, флюс;  
3) металлический лом, топливо, флюс.
9. Основным источником тепла в доменной печи является:
- 1) кокс;
  - 2) каменный уголь;
  - 3) природный газ.
10. Основной целью доменного процесса является:
- 1) восстановление железа из окислов;
  - 2) окисление железа;
  - 3) науглероживание железа.
11. Схема восстановления железа в доменной печи следующая:
- 1)  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ ;
  - 2)  $\text{Fe} \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$ ;
  - 3)  $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}$ .
12. Компонентом шихты для косвенного восстановления железа в доменной печи является:
- 1) твердый углерод;
  - 2)  $\text{CO}_2$ ;
  - 3)  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ .
13. Компонентом шихты для прямого восстановления железа в доменной печи является:
- 1)  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ ;
  - 2)  $\text{CO}_2$ ;
  - 3) твердый углерод.
14. Основным продуктом доменного производства является:
- 1) передельный чугун;
  - 2) литейный чугун;
  - 3) сталь.
15. Вредными примесями в железных рудах являются:
- 1) сера и фосфор;
  - 2) кремний и марганец;
  - 3) оксиды железа.
16. Вредными примесями в сталях являются:
- 1) железо и углерод;
  - 2) кремний и марганец;
  - 3) сера и фосфор.
17. Параметром, по которому оценивается качество стали, является:
- 1) содержание углерода;
  - 2) механические свойства стали;
  - 3) содержание S и P.
18. Раскислителями при получении спокойной стали являются:
- 1) ферромарганец;
  - 2) ферромарганец и Al;
  - 3) ферромарганец, ферросилиций и Al.
19. Раскислителями при получении кипящей стали являются:
- 1) ферромарганец;
  - 2) ферромарганец и ферросилиций;
  - 3) ферромарганец, ферросилиций и Al.
20. Основным исходным материалом для получения стали в кислородных конвертерах является:
- 1) передельный чугун;
  - 2) металлолом (скрап);
  - 3) железная руда.

21. Содержание углерода в сталях составляет:
- 1) до 0,8 %;
  - 2) до 2,14 %;
  - 3) более 2,14 %.
22. Содержание углерода в чугунах составляет:
- 1) до 2,14 %;
  - 2) 0,006...0,025 %;
  - 3) более 2,14 %.
23. Приспособлением в литейной форме для компенсации усадки сплава при кристаллизации является:
- 1) выпор;
  - 2) прибыль;
  - 3) стержень.
24. Связующим материалом при литье в оболочковые формы является:
- 1) глина;
  - 2) жидкое стекло;
  - 3) термореактивная смола.
25. Материалом моделей при литье в оболочковые формы является:
- 1) дерево;
  - 2) металл;
  - 3) пластмасса.
26. Формовочной смесью при литье в оболочковые формы является:
- 1) песчано-глинистая;
  - 2) металлокерамическая;
  - 3) песчано-смоляная.
27. Способ литья, обеспечивающий высокую точность размеров и малую шероховатость поверхности отливки, это:
- 1) литье в песчано-глинистую разовую форму;
  - 2) центробежное литье;
  - 3) литье в кокиль.
28. Недостатком литья в оболочковые формы является:
- 1) ограничение по массе и размерам детали;
  - 2) малая точность размеров отливки;
  - 3) высокая шероховатость поверхности отливки.
29. Необходимым свойством сплава для получения тонкостенных отливок является:
- 1) малая усадка;
  - 2) низкая температура плавления;
  - 3) хорошая жидкотекучесть.
30. Величина, на которую линейные размеры модели больше размеров отливки, называется:
- 1) припуском на механическую обработку;
  - 2) формовочным уклоном;
  - 3) усадкой металла.
31. Приспособлением для получения в отливках отверстий, пазов и выемок является:
- 1) стержень;
  - 2) модель;
  - 3) выпор.
32. Приспособлением для получения в литейной форме отпечатка полости, соответ-

вующего внешней конфигурации отливки, является:

- 1) стержень;
- 2) модель;
- 3) стержневой знак.

33. Способом литья, обеспечивающим получение мелкозернистой структуры, является:

- 1) литье в кокиль;
- 2) литье в песчано-глинистую разовую форму;
- 3) литье в оболочковую форму.

34. Элементами модели, обеспечивающими ее извлечение из литейной формы без повреждения последней, являются:

- 1) формовочные уклоны;
- 2) радиусы закруглений;
- 3) стержневые знаки.

35. Способом литья чугуновых и стальных труб большого диаметра и большой длины является:

- 1) литье под давлением;
- 2) литье в песчано-глинистую разовую форму;
- 3) центробежное литье.

36. Способом литья, приводящим к газоусадочной пористости отливок, является:

- 1) литье в кокиль;
- 2) литье в оболочковые формы;
- 3) литье под давлением.

37. Противопрigarным материалом формовочных смесей для чугунового литья является:

- 1) каменноугольная пыль;
- 2) пылевидный кварц;
- 3) глина.

38. Основным связующим материалом в формовочной смеси является:

- 1) жидкое стекло;
- 2) глина;
- 3) термореактивная смола.

39. Усадка металла учитывается в размере:

- 1) готовой детали;
- 2) отливки;
- 3) модели.

40. Способность формовочной смеси обеспечивать сохранность формы (стержня) без разрушения при ее изготовлении и использовании называется:

- 1) пластичностью;
- 2) прочностью;
- 3) податливостью.

41. Линейная усадка углеродистой стали составляет:

- 1) 3,0...3,4 %;
- 2) 0,8...1,8 %;
- 3) 2,0...2,4 %.

42. Приспособлениями для изготовления литейных полуформ являются:

- 1) опоки;
- 2) стержневые ящики;
- 3) специальные контейнеры.

43. Линейная усадка чугуна составляет:

- 1) 1,8...2,2 %;
- 2) 0,9...1,5 %;
- 3) 2,8...3,2 %.

44. Сопротивление формовочной смеси истирающему воздействию струи металла при его заливке называется:
- 1) прочностью;
  - 2) поверхностной прочностью;
  - 3) термохимической устойчивостью.
45. Основным исходным материалом для формовочных и стержневых смесей является:
- 1) песок;
  - 2) каменноугольная пыль;
  - 3) жидкое стекло.
46. Способность формовочной смеси воспринимать очертания модели (стержневого ящика) и сохранять полученную форму называется:
- 1) пластичностью;
  - 2) податливостью;
  - 3) текучестью.
47. Формовочная смесь для заполнения основного объема литейной формы называется:
- 1) единой;
  - 2) облицовочной;
  - 3) наполнительной.
48. Элементом литниковой системы, уменьшающим размывающее воздействие струи металла, является:
- 1) литниковая чаша;
  - 2) шлакоуловитель;
  - 3) стояк.
49. Способность формовочной смеси обтекать модели при формовке и заполнять полость стержневого ящика называется:
- 1) пластичностью;
  - 2) податливостью;
  - 3) текучестью.
50. Способность формовочной смеси сокращаться в объеме под действием усадки металла называется:
- 1) податливостью;
  - 2) пластичностью;
  - 3) текучестью.
51. Недостатком литья в кокиль является:
- 1) низкая производительность процесса;
  - 2) крупнозернистая структура металла отливки;
  - 3) трудоемкость изготовления сложных по конфигурации и тонкостенных отливок.
52. Способом литья, обладающим наибольшей производительностью, является:
- 1) литье в кокиль;
  - 2) литье под давлением;
  - 3) литье в оболочковую форму.
53. Подмодельный щиток — это:
- 1) плита, служащая для установки моделей и опок при ручной формовке;
  - 2) подставка для хранения моделей;
  - 3) щиток для выталкивания модели из формы при ручной формовке.

54. Способом литья для получения цилиндрических деталей типа втулок, труб, колец, подшипников скольжения является:
- 1) центробежное литье;
  - 2) литье в разовые формы;
  - 3) литье под давлением.
55. Дефектами отливок при недостаточной податливости формовочной смеси являются:
- 1) трещины;
  - 2) газовые пузыри;
  - 3) пленки пригара.
56. Материалом моделей при литье по выплавляемым моделям является:
- 1) дерево;
  - 2) металл;
  - 3) парафин со стеарином.
57. Знаки стержня в литейной форме представляют собой следующее:
- 1) отверстия для отвода газов из стержня при заливке формы;
  - 2) углубления, в которые устанавливаются стержни перед заливкой;
  - 3) каналы для поступления в форму расплавленного металла.
58. Стержневые ящики используются для:
- 1) хранения стержней;
  - 2) изготовления стержней;
  - 3) получения стержневых смесей.
59. Модель при литье по выплавляемым моделям извлекается:
- 1) выбиванием;
  - 2) с помощью подъемов;
  - 3) выплавлением.
60. Машинным способом формовки является:
- 1) формовка по шаблону;
  - 2) формовка в стержнях;
  - 3) формовка встряхиванием.
61. Для плавки в чугунолитейных цехах чаще всего используется:
- 1) вагранка;
  - 2) электродуговая трехфазная печь;
  - 3) индукционная печь.
62. Для плавки в сталелитейных цехах чаще всего используется:
- 1) доменная печь;
  - 2) индукционная печь;
  - 3) мартеновская печь.

### Уровень II (продуктивный)

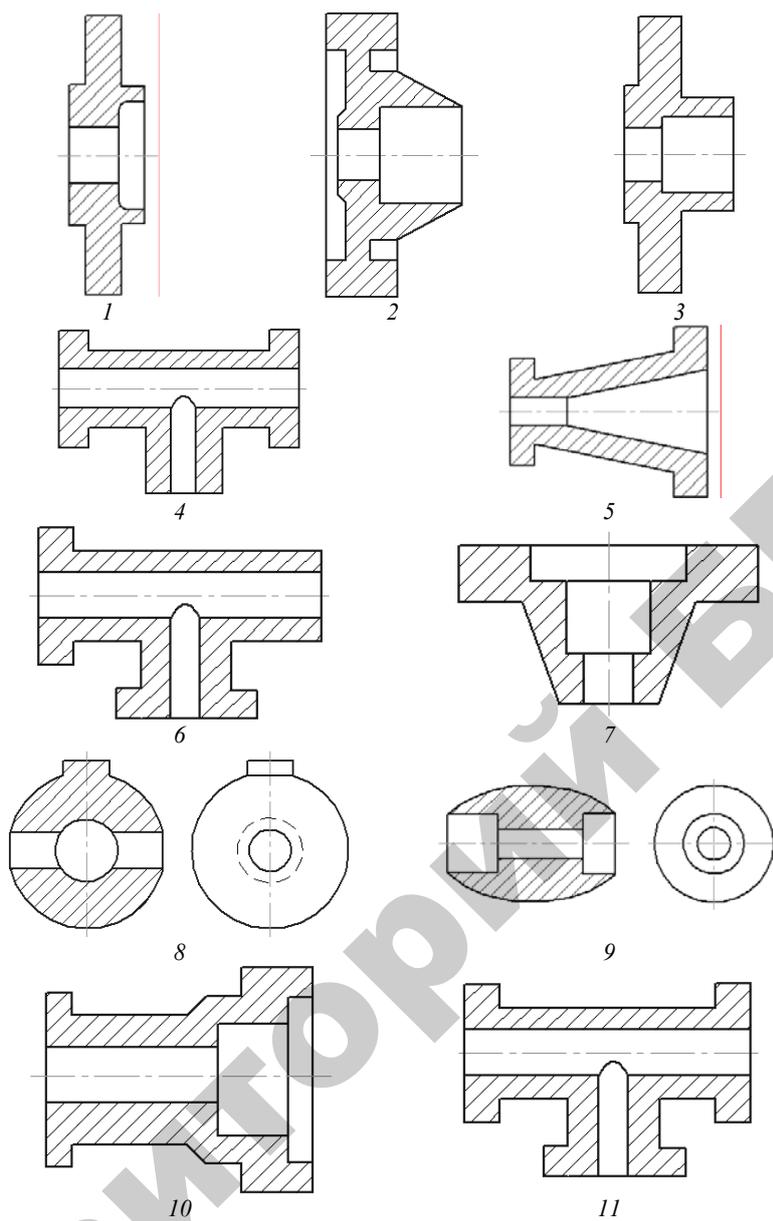
1. Схема и основные элементы доменной печи.
2. Принцип работы доменной печи, химические реакции протекающих в ней процессов.

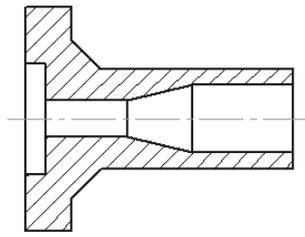
3. Исходные материалы, используемые для производства чугуна. Продукты доменной плавки.
4. Схема и принцип работы кислородного конвертера.
5. Технология получения отливок центробежным литьем. Разновидности и схемы этого метода. Преимущества и недостатки.
6. Технология получения отливок литьем под давлением. Разновидности и схемы этого метода. Преимущества и недостатки.
7. Технология получения отливок по выплавляемым моделям, последовательность операций (привести схемы). Преимущества и недостатки.
8. Технология получения отливок в оболочковых формах. Последовательность операций (привести схемы). Преимущества и недостатки.
9. Литейные свойства сплавов и пути получения отливок без дефектов.
10. Технология получения отливок методами жидкой прокатки, выжимания, намораживания.
11. Технология получения отливок литьем в кокиль. Подготовка кокиля к работе. Преимущества и недостатки.
12. Технология получения отливок в песчано-глинистой форме (ПГФ). Приспособления, необходимые для изготовления ПГФ и ее основные элементы.
13. Маркировка и области применения литейных чугунов и литейных сталей.
14. Маркировка и области применения литейных сплавов на основе цветных металлов.
15. Различные виды машинной формовки. Их преимущества, недостатки и область применения.

### **Уровень III (творческий)**

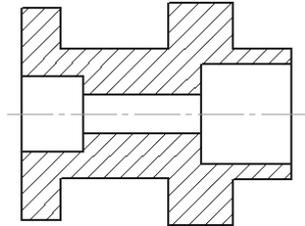
Спроектировать разовую песчано-глинистую форму для изготовления одной из приведенных конкретных деталей (15 вариантов). Изобразить эскизы: детали, модели, стержня и формы в сборе. На эскизе формы в сборе обозначить ее основные элементы.

Варианты деталей:

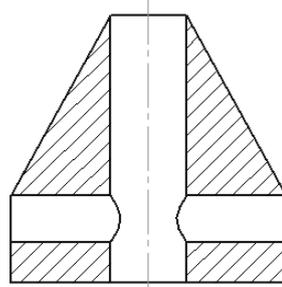




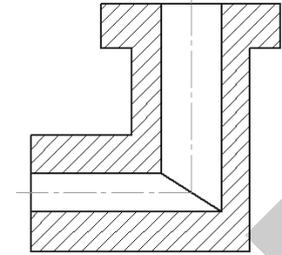
12



14



13



15

## МОДУЛЬ 2. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

В результате изучения модуля студент должен:

– **знать** физические основы пластической деформации, технологию, оборудование и инструмент основных видов обработки металлов давлением;

– **уметь** осуществлять выбор видов обработки металлов давлением, оборудования и инструмента в зависимости от условий реализации процесса.

### Тематический план модуля 2

Наименование занятия, перечень основных вопросов	Количество аудиторных часов			
	Всего	Лекции	Лабораторные занятия	УРС
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Физические основы пластической деформации</i> 1. Общие сведения об обработке металлов давлением. 2. Сущность пластической деформации. 3. Наклеп и рекристаллизация. 4. Холодная и горячая обработка металлов давлением. 5. Нагрев металла при обработке металлов давлением	2	2		
<i>Изменение механических свойств и структуры металлов при пластической деформации</i> 1. Деформирование образцов. 2. Исследование свойств и структуры образцов после пластической деформации и рекристаллизационного отжига	2		2	
<i>Получение машиностроительных профилей</i> 1. Прокатка металлов. 2. Прессование металлов. 3. Волочение металлов	2	2		
<i>Определение основных параметров, характеризующих деформацию металла, и условий захвата заготовки валками при продольной прокатке</i> 1. Определение основных параметров, характеризующих деформацию металла при продольной прокатке. 2. Расчет возможности захвата заготовки валками при продольной прокатке	2		2	

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Влияние степени деформации металла на его механические свойства при волочении</i>				
1. Определение основных параметров, характеризующих деформацию металла при волочении. 2. Влияние деформации при волочении металла на его механические свойства	2		2	
<i>Получение машиностроительных заготовок</i>				
1. Виды поковок. 2. Ковка металлов. 3. Горячая и холодная объемная штамповка металлов. 4. Листовая штамповка металлов	2	2		
<i>Разработка технологического процессаковки конкретной детали (управляемая самостоятельная работа студентов)</i>	2			2
<i>Контроль по модулю</i>	2			2
<b><i>Итого по модулю 2</i></b>	<b>16</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>4</b>

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ МОДУЛЯ 2

### 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

#### 1.1. Общие сведения об обработке металлов давлением

В основе всех процессов обработки металлов давлением (ОМД) лежит способность металлов и их сплавов под действием внешних сил пластически деформироваться, т. е., не разрушаясь, необратимо изменять свою форму и размеры. При этом изменяется структура металла, его механические и физические свойства.

Обработка металлов давлением известна с древнейших времен. Холодная ковка самородной меди и метеоритного железа была известна еще до того, как люди начали добывать металлы из руд (VII в. до н. э.). Техника обработки металлов давлением получила развитие в X...XIII веках, когда кузнецы научились изготавливать многослойные мечи и топоры со стальными закаливаемыми лезвиями, а также предметы бытового назначения, инструменты и ремесленные приспособления. Ручная ковка была исторически первым из применяемых до сих пор способов формоизменяющей обработки металлов. Первый паровой молот, появившийся в 1843 г., деформировал металл силой падения груза, а для поднятия которого использовался пар. В 1888 г. появился молот двойного действия, у которого верхняя «баба» при движении вниз дополнительно разгонялась силой пара. Прокатка металлов возникла позжековки и волочения. Первые сведения о прокатке относятся к XV в. (прокатка свинцовых полос). Основоположником современных методов прокатки принято считать английского изобретателя Г. Корта, изготовившего первый прокатный стан в 1783 г.

В настоящее время давлением обрабатывают около 90 % всей выплавляемой в мире стали, а также большое количество цветных металлов и их сплавов (до 60 %). В машиностроении наиболее широко применяется штамповка (горячая объемная и листовая). В современном автомобиле насчитывается до 90 % штампованных деталей (облицовочные детали, детали подвески, колесные диски, валы и шестерни коробки передач, детали двигателя (поршни, шатуны, коленчатые и распределительные валы, клапаны), тормозные колодки, бензобаки, глушители и др.), половина из которых не подвергается никаким другим видам обработки, в тракторе — 70 %. Современные двигатели конструктивно состоят из деталей (до 100 %), полученных ОМД.

**Обработка металлов давлением** — группа методов получения полуфабрикатов или изделий требуемых размеров и формы путем пластического деформирования заготовок за счет приложения внешних усилий.

Основными процессами ОМД являются: прокатка, прессование, волочение, ковка, объемная и листовая штамповка. По назначению они подразделяются на следующие две группы:

1. Процессы ОМД, направленные на получение **машиностроительных профилей** — изделий постоянного поперечного сечения по их длине (прутков, труб, проволоки, лент, листов и др.). К этим процессам относятся *прокатка, прессование и волочение*. Изделия, полученные этими методами, применяются в строительных конструкциях или в качестве заготовок для последующего изготовления из них деталей другими методами (резанием, ковкой, штамповкой и т. д.).

2. Процессы ОМД, направленные на получение **машиностроительных заготовок**, которые имеют форму и размеры, приближенные к готовым деталям, и только в ряде случаев требуют обработки резанием для придания им окончательных размеров и получения необходимого качества поверхности. К этим процессам относятся *ковка и штамповка*.

При ОМД, во-первых, достигается получение изделий сложной формы из заготовок простой формы и, во-вторых, улучшается кристаллическая структура исходного литого металла и повышаются его физико-механические свойства.

*Преимуществами* методов ОМД являются следующие:

- 1) низкая трудоемкость процессов и, следовательно, их высокая производительность;
- 2) рациональное использование металла (коэффициент использования металла (КИМ) приближается к единице);
- 3) стабильность размеров и относительно высокая точность изготавливаемых деталей при большой сложности их форм;
- 4) универсальность используемого прессового оборудования;
- 5) возможности для механизации и автоматизации технологических процессов;
- 6) простота осуществления процесса.

Главными *недостатками* методов ОМД являются следующие: относительно высокая стоимость инструмента (в условиях серийного

производства она составляет до 14 % от себестоимости деталей), а также сложность и уникальность прессового оборудования.

## 1.2. Сущность пластической деформации

Следует отметить, что металлы характеризуются наличием металлической связи, когда в узлах атомно-кристаллической решетки расположены положительно заряженные ионы, окруженные электронным газом. Наличие такой металлической связи и придает металлу способность подвергаться пластической деформации.

**Пластичность** — свойство твердого тела под действием внешних сил или внутренних напряжений, не разрушаясь, необратимо изменять свою форму и размеры. Такое изменение формы и размеров металлического тела называют *пластической деформацией*.

**Деформация** — изменение формы и размеров твердого тела под влиянием приложенных внешних сил. Деформация может быть *упругой*, исчезающей после снятия нагрузки, и *пластической*, остающейся после снятия нагрузки.

**Механизмы пластической деформации.** Как бы не были малы приложенные к металлу усилия, они вызывают его деформацию. Начальные деформации всегда являются упругими, и величина их находится в прямой зависимости от нагрузки (закон Гука). При упругой деформации под действием внешних сил изменяются расстояния между атомами в кристаллической решетке. После снятия нагрузки атомы под действием межатомных сил возвращаются в исходное положение, и металл восстанавливает свои первоначальные размеры и форму.

**Скольжение.** При пластической деформации одна часть кристалла необратимо сдвигается по отношению к другой на целое число периодов атомно-кристаллической решетки — смещается по так называемым плоскостям сдвига (скольжения). Следует отметить, что ими являются кристаллографические плоскости, в которых находится наибольшее количество атомов. Расположение этих плоскостей зависит от типа атомно-кристаллической решетки металла. У  $\alpha$ -железа, вольфрама, молибдена и других металлов с объемно-центрированной кубической (ОЦК) решеткой имеется шесть плоскостей сдвига (в каждой из них имеется по два направления сдвига) и так называемая система скольжения (имеет  $6 \cdot 2 = 12$  элементов

сдвига) (рис. 2.1, *a*). При этом  $\gamma$ -железо, медь, алюминий и другие металлы с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой имеют четыре плоскости сдвига с тремя направлениями скольжения в каждой, т. е.  $4 \cdot 3 = 12$  элементов сдвига (рис. 2.1, *б*). У цинка, магния и других металлов с гексагональной плотноупакованной (ГПУ) решеткой имеется одна плоскость с тремя направлениями скольжения, т. е. три элемента сдвига (рис. 2.1, *в*). Чем больше элементов сдвига в решетке, тем выше пластичность металла.

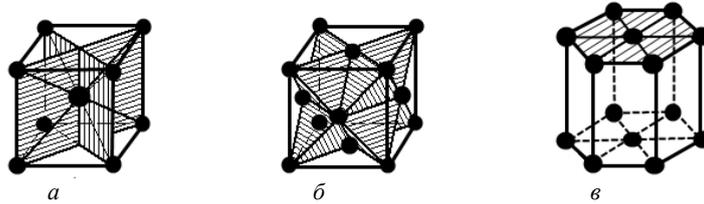


Рис. 2.1. Плоскости и направления (заштрихованные плоскости) сдвига в кристаллической решетке: *a* — ОЦК; *б* — ГЦК; *в* — ГПУ

Наиболее легкий сдвиг по определенным плоскостям и направлениям объясняется тем, что при таком перемещении атомов из одного устойчивого равновесного положения в другое значения затрачиваемых усилий будут минимальными, и, следовательно, будут наименьшими необходимые для этого затраты энергии.

Если нагрузку снять, перемещенная часть кристалла не возвратится на старое место и деформация сохранится. Наличие плоскостей скольжения в кристалле подтверждается при микроструктурном исследовании пластически деформированных металлов.

**Двойникование.** Скольжение или сдвиг по определенным кристаллографическим плоскостям является основным, но не единственным механизмом пластической деформации металлов. При некоторых условиях пластическое деформирование может также происходить путем двойникования. При пониженных температурах у металлов с ОЦК решеткой наблюдается переход от механизма скольжения к механизму двойникования. Сущность двойникования заключается в том, что под действием касательных напряжений одна часть зерна оказывается смещенной по отношению к другой части, занимая симметричное положение и являясь как бы ее зеркальным отражением (рис. 2.2).

**Дислокационный механизм пластической деформации.** Процесс скольжения не следует представлять как одновременное передвижение одной части кристалла относительно другой. Такой жесткий или синхронный сдвиг потребовал бы напряжений в сотни или даже тысячи раз превышающие по величине те, при которых в действительности протекает процесс пластической деформации. В реальных металлах сдвиг (пластическое деформирование) происходит при напряжениях, величина которых меньше теоретических в сотни и тысячи раз (например, для железа  $\tau_{\text{теор}} \approx 2\,600$  МПа, а  $\tau_{\text{реал}} \approx 290$  МПа, для меди  $\tau_{\text{теор}} \approx 1\,540$  МПа, а  $\tau_{\text{реал}} \approx 1$  МПа). Такое расхождение объясняется дислокационным механизмом пластической деформации.

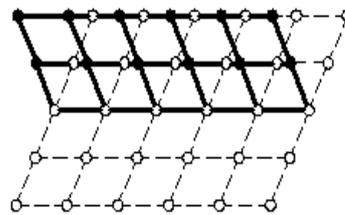


Рис. 2.2. Схема процесса двойникования

При дислокационном механизме пластической деформации скольжение осуществляется в результате перемещения в кристалле дислокации, когда сдвиг происходит последовательно от атома к атому вблизи ядра дислокации. В этом случае усилие сдвига значительно меньше, чем при одновременном сдвиге всех атомов.

Данный процесс можно объяснить с помощью моделей движения гусеницы (рис. 2.3, а) и перемещения ковра (рис. 2.3, б).

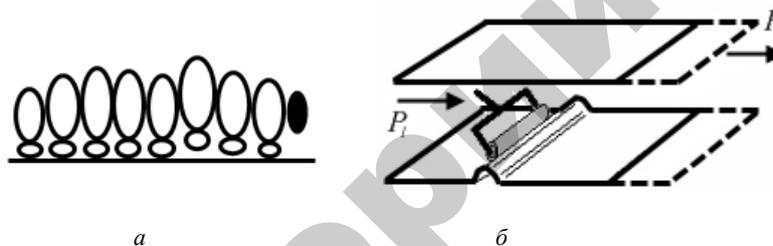


Рис. 2.3. Дислокационный механизм пластической деформации: а — модель движения гусеницы; б — модель перемещения ковра

Гусеница перемещается путем последовательного подъема одной пары ног и перестановки их в новое место, а не за счет подъема всех ног одновременно и перемещения на шаг. Когда

все ноги гусеницы последовательно выполняют эту операцию, то она переместится на шаг (такой режим движения требует от нее значительно меньших усилий). Аналогичным образом происходит перемещение ковра по полу в случае прокатывания на нем складки, что требует значительно меньших усилий, чем, транспортировка ковра целиком.

Дислокационный механизм пластической деформации объясняется следующим образом. Атомы, расположенные в поле дислокации, возбуждены (их энергия повышена) и выведены из устойчивого положения равновесия с минимальной свободной энергией. Такое состояние кристалла является метастабильным. Поэтому для того чтобы ограниченная группа атомов в области дислокации сдвинулась и заняла новое устойчивое положение равновесия, достаточно приложить существенно меньшее напряжение, чем при их синхронном сдвиге, т. е. совершить незначительную работу и затратить при этом минимум энергии.

Механизм перемещения дислокации на атомном уровне представлен на рисунке 2.4.

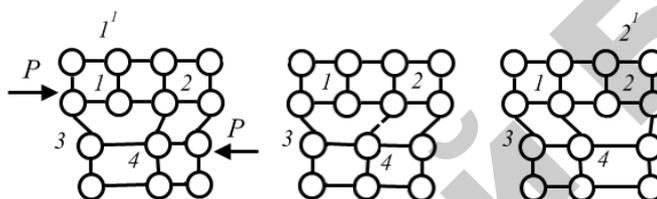


Рис. 2.4. Схема перемещения дислокаций

Следует отметить, что силы взаимодействия атомов зависят от расстояния. В зоне дислокации расстояния атомов 3 и 4 от краевого атома 1 экстроплоскости  $1 - 1'$  увеличены и связи между этими атомами утрачены. Под действием сдвигающей силы  $P$  смещение плоскостей приводит к уменьшению расстояния  $1 - 4$  и увеличению расстояния  $2 - 4$ . В результате этого связь между атомами 1 и 4 восстанавливается, а между атомами 2 и 4 обрывается. Дислокация перемещается на одно межатомное расстояние.

Таким образом, движение дислокации — это процесс последовательного разрыва и восстановления связей в кристаллической решетке. В результате пробега дислокации от одной границы кри-

сталла до другой происходит смещение части кристалла на одно межатомное расстояние. Из совокупности пробегов дислокаций складывается общая деформация кристаллического тела.

### 1.3. Наклеп и рекристаллизация

Пластическая деформация поликристаллических тел (металлов и сплавов) имеет некоторые особенности по сравнению с пластической деформацией одного зерна (монокристалла). В поликристаллическом металле зерна (следовательно, и плоскости скольжения) имеют различную ориентировку (рис. 2.5, *а*). Из-за влияния соседних зерен деформирование каждого зерна не может совершаться свободно. Пластическая деформация на первой стадии начинается тогда, когда действующие напряжения превысят предел упругости. На первой стадии пластическая деформация может происходить лишь в отдельных зернах с благоприятной ориентировкой, у которых плоскости легкого скольжения совпадают с направлением максимальных касательных напряжений. В каждом зерне сдвиг происходит последовательно: сначала по одной плоскости, затем по другой и т. д. Кроме сдвига, происходит и поворот смещенных частей зерна в направлении уменьшения угла между направлениями плоскостей скольжения и направлением растягивающих сил. В результате сдвигов и поворота плоскостей скольжения зерно постоянно вытягивается в направлении растягивающих сил (рис. 2.5, *б*). Зерна удлиняются настолько, что напоминают волокна, поэтому структура деформированного металла называется волокнистой (рис. 2.5, *в*). Дальнейшая деформация (вторая стадия) приводит к дроблению зерен.

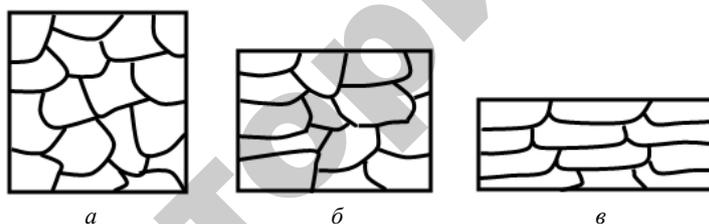


Рис. 2.5. Схема образования текстуры в поликристаллитном теле: *а* — исходное расположение зерен; *б* — изменение формы зерен при пластической деформации; *в* — текстура металла после деформации

В процессе межзеренных и внутризеренных сдвигов происходит искажение кристаллической решетки, удлинение и поворот зерен, их последующее дробление, что, в конечном итоге, затрудняет дальнейшее скольжение. Это вызывает возрастание сопротивления деформации. Кроме того, неравномерная деформация отдельных зерен приводит к возникновению внутренних напряжений, которые так же вызывают увеличение сопротивления деформации.

При холодной пластической деформации изменения структуры приводят к повышению твердости НВ и предела прочности металла  $\sigma_b$ , а также понижению его пластических (относительное удлинение  $\delta$ ) и вязкостных (ударная вязкость  $KC$ ) свойств (рис. 2.6). Чем больше величина пластической деформации  $\epsilon$ , тем значительнее эти изменения.

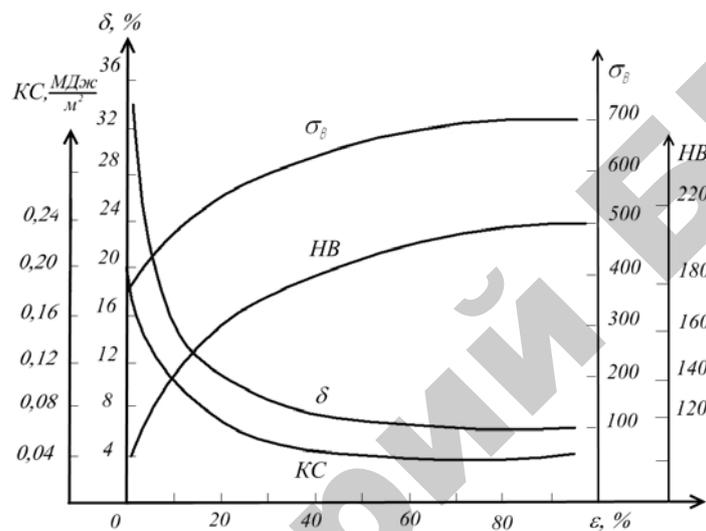


Рис. 2.6. Влияние степени деформации на механические свойства металлов

Изменение свойств и структуры металла в результате пластической деформации в холодном состоянии называется **наклепом** или упрочнением. Интенсивность нарастания наклепа по мере увеличения степени деформации неодинакова (в начальный момент деформирования она резко увеличивается, а затем замедляется).

Наклеп не всегда является отрицательным фактором, затрудняющим процесс получения заготовки пластическим деформированием. Иногда его используют для получения изделия с необходимыми полезными свойствами (часто в сочетании с последующей термической обработкой). Так, холодной пластической деформацией можно в 2...3 раза повысить предел прочности (особенно предел текучести). Например, гвозди должны быть изготовлены и могут применяться только из наклепанного металла. Гвозди, у которых наклеп снят термической обработкой (побывавшие в печи), к применению непригодны.

Следует отметить, что наиболее прочным материалом в современной технике является нагартованная (упрочненная) стальная проволока (в немецком языке слово *hard* означает твердость), получаемая в результате холодного волочения при  $\varepsilon = 80\text{...}90\%$  и имеющая  $\sigma_{\text{в}} = 3\ 000\text{...}4\ 000$  МПа. Такая высокая прочность не может быть достигнута легированием и термической обработкой.

Понижение пластических свойств наклепанного металла может быть очень значительным. Например, у низкоуглеродистой стали относительное удлинение  $\delta$  уменьшается почти в 6 раз (с 30...35 до 5...6 %).

При определенной степени деформации металл утрачивает пластичность настолько, что дальнейшее деформирование внешним усилием может привести к его разрушению.

**Возврат и рекристаллизация.** Деформированный металл по сравнению с недеформированным находится в неравновесном состоянии. В таком металле даже при комнатной температуре могут самопроизвольно протекать процессы, приводящие его в более устойчивое внутреннее состояние. При повышении температуры скорость таких процессов возрастает.

При нагреве до сравнительно низких температур протекает процесс **возврата**, т. е. снятие микронапряжений и частично искажений кристаллической решетки. Изменений структуры при этом еще не наблюдается. Возврат несколько изменяет свойства наклепанного металла (понижается его прочность и повышается пластичность). Возврат происходит при температуре  $(0,2\text{...}0,3) T_{\text{пл}}$ , °К.

При дальнейшем нагреве в результате теплового воздействия происходит перестройка кристаллов деформированного тела, заро-

ждение новых зерен (кристаллов) и их рост. Такой процесс называется **рекристаллизацией**.

В результате рекристаллизации (рис. 2.7) образуются совершенно новые зерна, с неискаженной кристаллической решеткой. Размеры новых зерен могут сильно отличаться от исходных. Образование новых зерен приводит к резкому снижению плотности дислокаций и высвобождению энергии, накопленной при пластической деформации металла. В результате рекристаллизации металл разупрочняется и восстанавливает свои первоначальные свойства, а его зерна становятся равноосными.

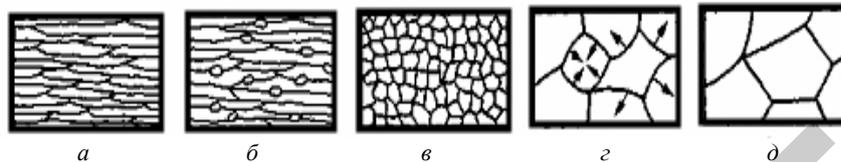


Рис. 2.7. Изменения микроструктуры деформированного металла при нагреве: *а* — наклепанный металл; *б* — начало первичной рекристаллизации; *в* — завершение первичной рекристаллизации; *г, д* — стадии собирательной рекристаллизации

Пластически деформированные металлы могут рекристаллизоваться лишь после деформации, степень которой превышает определенное критическое значение, которое называется **критической степенью деформации**. Для алюминия она составляет ~2 %, для железа и меди — ~5 %. Если степень деформации меньше критической, то зарождения новых зерен при нагреве не происходит.

Наименьшая температура нагрева, обеспечивающая возможность зарождения новых зерен, называется **температурой рекристаллизации**  $T_{\text{рекр}}$ . Рекристаллизация для технически чистых металлов происходит при температурах  $T_{\text{рекр}} \geq 0,4 T_{\text{пл}}$ , °К. Температура рекристаллизации  $T_{\text{рекр}}$  некоторых металлов представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Температура плавления и рекристаллизации некоторых металлов

Металл	W	Mo	Fe	Cu	Al	Zn	Pb
$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	3 400	2 625	1 535	1 084	660	419	327
$t_{\text{рекр}}, ^\circ\text{C}$	1 200	900	450	200	100	20	< 20

Зарождение новых зерен при рекристаллизации происходит обычно на границах деформированных зерен (рис. 2.7, б). Чем выше степень пластической деформации, тем больше возникает центров рекристаллизации. С течением времени образовавшиеся центры новых зерен увеличиваются в размерах.

Рассмотренная стадия рекристаллизации называется *первичной рекристаллизацией*. Первичная рекристаллизация заканчивается при полном замещении новыми зернами всего объема деформированного металла (рис. 2.7, в). Первичная рекристаллизация полностью снимает наклеп, созданный при пластической деформации. Металл приобретает равноосную зернистую структуру с минимальным количеством дефектов кристаллического строения. Свойства металла после его рекристаллизации близки к свойствам отожженного металла.

После завершения первичной рекристаллизации при увеличении времени выдержки (или температуры) происходит рост одних образовавшихся зерен за счет других. Рост зерен происходит из-за того, что одни зерна постепенно увеличиваются в размерах, поглощая соседние зерна. Эта стадия рекристаллизации называется *собирательной рекристаллизацией* (рис. 2.7, г, д). В результате образуется небольшое число очень крупных зерен и множество мелких. Такая разнорзернистость снижает механические свойства металла и является нежелательной.

На рисунке 2.8 приведены графики изменения величины твердости  $HВ$  и характеристики пластичности  $\delta$  наклепанного металла при нагреве: *I* — возврат; *II* — первичная рекристаллизация; *III* — рост зерен

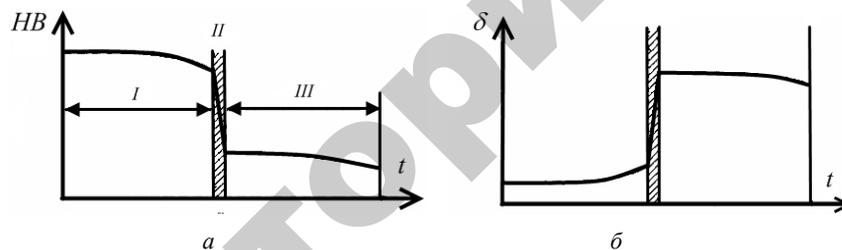


Рис. 2.8. Изменения величины твердости  $HВ$  (а) и характеристики пластичности  $\delta$  (б) наклепанного металла при нагреве: *I* — возврат; *II* — первичная рекристаллизация; *III* — рост зерен

#### 1.4. Холодная и горячая обработка металлов давлением

В зависимости от температурных условий деформирования различают холодную и горячую ОМД.

**Холодной обработкой металлов давлением** называется процесс, при котором деформирование производится при температуре ниже температуры рекристаллизации ( $0,4 T_{пл}$ ) металла и сопровождается его наклепом.

Процесс холодной ОМД характеризуется изменением формы зерен, которые вытягиваются в направлении течения металла (волокнустая структура) и его механических свойств (по мере увеличения степени деформации характеристики прочности возрастают, а пластичности и вязкости уменьшаются).

По сравнению с обработкой давлением при достаточно высоких температурах холодное деформирование позволяет получать изделия или заготовки, характеризующиеся большей точностью размеров и лучшим качеством поверхности. Такая технология позволяет сократить продолжительность технологического цикла, облегчает использование средств механизации и автоматизации и повышает производительность труда.

**Горячей обработкой металлов давлением** называется процесс, при котором деформирование производится выше температуры рекристаллизации ( $0,4 T_{пл}$ ) и характеризуется таким соотношением скоростей деформирования и рекристаллизации, при котором рекристаллизация успевает пройти во всем объеме заготовки и микроструктура после обработки давлением оказывается равноосной без следов упрочнения.

При горячей деформации пластичность металла выше, а сопротивление деформированию примерно в 10 раз меньше, чем при холодной деформации. Кроме того, отсутствие упрочнения приводит к тому, что сопротивление деформированию (предел текучести) незначительно изменяется в процессе обработки давлением. Этим обстоятельством объясняется то, что горячую ОМД применяют для изготовления крупных деталей, поскольку при этом требуется меньшее усилие деформирования (менее мощное оборудование). Ее также целесообразно применять при обработке труднодеформируемых, малопластичных металлов и сплавов, а также заготовок из литого металла. Существуют металлы (цинк, вольфрам, молибден

и др.), которые из-за высокой хрупкости в холодном состоянии можно обрабатывать только методами горячей ОМД.

Горячая ОМД обеспечивает получение деталей с мелкозернистой структурой, которая повышает их прочность, ударную вязкость и усталостную прочность по сравнению с деталями с крупнозернистой структурой металла. Поэтому горячую обработку нужно заканчивать при температурах лишь немного превышающих минимальную температуру рекристаллизации. В этом случае образовавшиеся новые рекристаллизованные зерна не успевают вырасти, и структура металла получается мелкозернистой.

Несмотря на дополнительные затраты (в связи с необходимостью иметь специальное оборудование и дополнительные расходы энергии) горячая ОМД широко используется в промышленности. При горячей деформации следует поддерживать необходимую температуру в ходе самого процесса обработки давлением (особенно при производстве изделий небольшого объема и с развитой поверхностью). В этом случае процесс усложняется в связи с потерей теплоты при контакте с деформирующим инструментом.

### **1.5. Нагрев металла при обработке металлов давлением**

Нагрев металла при ОМД влияет на качество и стоимость продукции. При нагреве металла до соответствующей температуры необходимо обеспечить равномерный нагрев слитка или заготовки по сечению и длине за минимальное время с наименьшей потерей металла в окалину и экономным расходом топлива. Неправильный нагрев металла вызывает его дефекты (трещины, обезуглероживание, окисление, перегрев и пережог).

**Трещины.** Из-за неравномерного нагрева заготовки разность температур по ее сечению приводит к тому, что тепловое расширение между более нагретыми периферийными слоями и менее нагретыми внутренними слоями вызывает значительные напряжения внутри заготовки и появление в ней трещин. Это характерно для высокоуглеродистых, легированных и специальных сталей, имеющих низкую теплопроводность и, как правило, пониженную пластичность. Для качества изделий, получаемых горячей обработкой давлением, существенное значение имеют режимы нагрева и охлаждения. Слишком быстрое и неравномерное охлаждение также

приводит к образованию трещин или к короблению вследствие термических напряжений. Чем меньше теплопроводность стали, а также массивнее и сложнее конфигурация изделия, тем медленнее следует осуществлять нагрев и охлаждение.

**Окисление** приводит к появлению окалины, образующейся на поверхности стальных заготовок при нагреве на воздухе или в других средах, содержащих кислород. Так, слой окалины при нагреве углеродистой стали, состоящий из  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , может составлять 1...2 % от массы заготовки, что приводит к значительной потере металла.

**Обезуглероживание** — уменьшение содержания углерода в поверхностных слоях стальных изделий и заготовок при нагреве в средах, содержащих кислород и водород. При нагреве, например, стали толщина обезуглероженного слоя может составлять 1,5...2 мм.

**Перегрев** — обратимый дефект, возникающий при нагреве стали до температуры на 100...150 °С выше температуры, соответствующей точке  $A_{с3}$ . Он приводит к образованию крупнозернистой структуры и снижению механических свойств изготавливаемых изделий. Перегрев может быть устранен последующей термической обработкой (отжигом).

**Пережог** — необратимый дефект металла или сплава, заключающийся в окислении или оплавлении границ зерен в результате значительного превышения заданной температуры нагрева (нагрев до температуры близкой к температуре плавления).

Температуру начала и конца горячего деформирования определяют в зависимости от температуры плавления и рекристаллизации обрабатываемого металла.

Начальная температура горячей ОМД должна быть ниже температуры плавления, а конечная — выше температуры рекристаллизации. Так, для углеродистых сталей температуру горячего деформирования выбирают по диаграмме состояния Fe–C (рис. 2.9) на 100...200 °С ниже темпе-

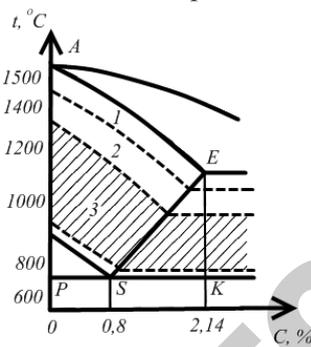


Рис. 2.9. Температурный интервал обработки давлением углеродистой стали: 1 — зона пережога; 2 — зона перегрева; 3 — область горячей обработки

ратуры начала плавления (линия солидус) стали, а температуру конца деформирования — на 50...100 °С выше температуры рекристаллизации.

Выбранная технология нагрева в сочетании с правильными режимами пластической деформации и охлаждения металла значительно улучшают все характеристики готовых изделий или заготовок.

**Нагревательные устройства.** Оборудование, применяемое для нагрева заготовок перед обработкой давлением, подразделяется на нагревательные печи и электронагревательные устройства.

К *нагревательным* печам относят оборудование, в котором теплота к заготовке передается конвекцией и излучением из нагревательной камеры. Под, стены и свод такой печи выполняют из огнеупорных материалов. Необходимую температуру (до 1300 °С и более) в печах получают сжиганием газообразного или жидкого топлива либо с помощью электрических нагревателей. По принципу действия печи подразделяются на камерные и методические.

К *камерным* относят печи, имеющие одинаковую температуру по всему рабочему пространству. В таких печах загрузку и выгрузку заготовок производят по мере необходимости.

*Методические* печи, как правило, имеют вытянутую в одном направлении форму и загрузочное окно, где устанавливается относительно невысокая температура, а также удлиненную камеру печи, по длине которой температура повышается, вплоть до конечной (температура около окна выгрузки). Нагреваемые заготовки перемещаются с установленной скоростью от загрузочного окна до окна выгрузки. В методических печах пламенного типа поток нагревающих газов направлен навстречу движению заготовок, что способствует их равномерному нагреву.

Основными параметрами, характеризующими нагрев металла перед обработкой давлением, являются температура, при которой заготовки помещаются в печь, скорость нагрева металла, конечная температура нагрева, время выдержки при заданной температуре, общая продолжительность нагрева. Все эти показатели оказывают серьезное влияние на процесс деформации и свойства металла заготовки после ее формообразования обработкой давлением.

Температура в печи в момент ее загрузки зависит от марки стали или рода материала, а также формы, размера и профиля нагре-

ваемой заготовки. Для стальных заготовок небольшого сечения (круглые заготовки диаметром до 100 мм) температура печи обычно составляет до 1 200...1 300 °С.

Скорость нагрева зависит, в основном, от перепада температур нагреваемой заготовки и температуры печи. Чем эта разница больше, тем больше скорость нагрева. Равномерность нагрева заготовки по сечению, в первую очередь, зависит от теплопроводности материала. Перепад температур между рабочим пространством печи и нагреваемой заготовкой в пламенных печах обычно составляет 150 °С.

Для уменьшения окисления материала заготовки, обезуглероживания и повышения производительности печи применяют так называемый «скоростной нагрев». При этом температуру печи повышают до 1 400...1 500 °С, а рабочее пространство печи существенно уменьшают. Скоростной нагрев более экономичен, чем обычный, но при этом увеличивается риск возникновения трещин в заготовке.

Кроме того, при скоростном нагреве, наряду с уменьшением времени пребывания заготовки в печи для достижения необходимой температуры, существенно возрастает скорость окисления. Чтобы уменьшить окисление при скоростном нагреве, следует избегать избытка кислорода, создавая в пространстве печи нейтральную или восстановительную атмосферу. В пламенных печах это достигается регулированием процесса сгорания топлива. Высокое содержание в атмосфере печи несгоревших СО и Н<sub>2</sub> позволяет производить скоростной нагрев, исключая окисление поверхности заготовок.

Для экономии топлива газы, отходящие из печи, используют для подогрева горючих смесей до температуры 500...900 °С. Это позволяет повысить эффективность работы и экономить до 35 % топлива.

В **электронагревательных устройствах** теплота выделяется непосредственно в самой заготовке в виде теплоты сопротивления при пропускании через нее большой силы тока (контактный нагрев) либо при возбуждении в заготовке вихревых токов в индукционных печах.

*Электроконтактный нагрев* обычно применяют в крупносерийном и массовом производстве для заготовок, имеющих постоянное сечение. Желательно, чтобы длина заготовок была значительно больше их диаметра. Время электроконтактного нагрева измеряется в секундах. Например, нагрев круглой заготовки диаметром 40 мм до температуры 1 200 °С происходит всего за 40 секунд.

При нагреве в *индукционных печах* толщина нагреваемого слоя зависит от частоты тока (чем она выше, тем более поверхностным и интенсивным будет нагрев). Поэтому для разогрева массивных заготовок иногда применяют промышленную частоту (50 Гц) тока. Глубина прогрева заготовки в этом случае может составлять 25...30 % ее толщины. Прогрев по всему сечению, т. е. центральной части заготовки, происходит за счет теплопроводности.

Нагревательные устройства имеют следующие *преимущества* перед печами:

- 1) высокая скорость нагрева (в 10...15 раз выше, чем в печах);
- 2) почти полное отсутствие окалины (в 4...5 раз меньше);
- 3) удобство в работе;
- 4) легкая автоматизация;
- 5) экологичность.

*Недостатками* этих устройств являются ограничения по габаритам нагреваемых заготовок, а также необходимость для каждого типа и размера заготовки иметь соответствующий индуктор и постоянное сечение. Кроме того, КПД индукторов относительно невелик.

При выборе типа нагревательной печи или устройства учитывают также массу заготовок и серийность производства.

#### **Вопросы для самоконтроля**

1. Основные процессы ОМД и их классификация по назначению.
2. Преимущества и недостатки методов ОМД.
3. Основные механизмы пластической деформации.
4. Изменение структуры и свойств металла при наклепе, возврате и рекристаллизации.
5. Холодная и горячая ОМД (их сущность, преимущества и недостатки).
6. Дефекты, возникающие в результате нагрева металла при ОМД.
7. Оборудование, применяемое для нагрева заготовок при ОМД.

## 2. ПОЛУЧЕНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ

### 2.1. Прокатка металлов

Хотя «отцом» современных методов прокатки принято считать Г. Корга, первый прокатный стан которого относится приблизительно к 1783 г., исторические документы свидетельствуют о том, что золото и серебро для чеканки монет прокатывались в листы во Франции еще в 1753 г., а наиболее ранний документ (рисунок с описанием), характеризующий устройство для прокатки олова, оставлен Леонардо да Винчи (1495).

Способ прокатки металлов, претерпев значительные изменения, широко применяется в настоящее время (прокатке подвергают до 90 % всей выплавляемой стали и большую часть цветных металлов).

**Прокатка** — вид горячей или холодной ОМД, при котором металл пластически деформируется вращающимися валками.

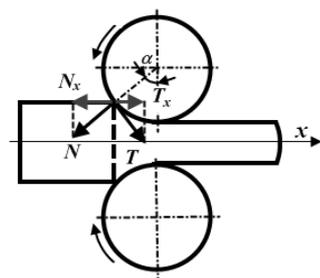


Рис. 2.10. Схема сил, действующих при прокатке

Процесс прокатки происходит за счет сил трения между вращающимся инструментом и заготовкой. Благодаря этому заготовка перемещается в зазоре между валками, одновременно деформируясь. В момент захвата заготовки со стороны каждого валка на нее действуют две силы: нормальная сила  $N$  (сила реакции валков) и касательная (сила трения  $T$ ) (рис. 2.10).

Угол  $\alpha$  называется углом захвата, дуга, по которой валок соприкасается с прокатываемым металлом — дугой захвата, а объем металла между дугами захвата — очагом деформации.

Возможность осуществления прокатки заготовки характеризуется условием захвата валками и определяется следующим неравенством:

$$T_x > N_x,$$

где  $T_x$  — втягивающая сила (проекция силы трения  $T$  на горизонтальную ось  $x$ );  $N_x$  — выталкивающая сила (проекция силы реакции валков  $N$  на горизонтальную ось  $x$ ).

При выполнении этого условия результирующая сила будет направлена в сторону движения заготовки.

Условие захвата заготовки можно выразить следующим неравенством:

$$T \cos \alpha > N \sin \alpha.$$

Воспользовавшись известной зависимостью  $T = fN$  (где  $f$  — коэффициент трения), и, подставив это выражение в условие захвата, получим следующие неравенство:

$$f \cos \alpha > \sin \alpha \text{ или } f > \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.1)$$

Таким образом, для захвата заготовки валками необходимо, чтобы коэффициент трения между ней и валками был больше тангенса угла захвата.

Контактное трение существенно влияет на давление металла на валки, расход энергии при прокатке, перемещение металла при его деформировании, качество поверхности и однородность структуры прокатываемой заготовки.

Коэффициент трения при прокатке зависит от многих факторов и, в первую очередь, от состояния контактных поверхностей и условий соприкосновения (качества и вида обрабатываемого материала, температуры прокатки, наличия на его поверхности оксидов, присутствия и вида смазки, величины давления и скорости прокатки).

При горячей прокатке стали гладкими валками угол захвата равен  $15 \dots 24^\circ$ , при холодной —  $5 \dots 8^\circ$ , при горячей прокатке листов и полос из цветных металлов —  $12 \dots 15^\circ$ , при холодной прокатке —  $2 \dots 10^\circ$ .

С увеличением скорости прокатки коэффициент трения несколько снижается. Например, для стальных валков он определяется по формуле

$$f = 1,05 - 0,0005t - 0,0556v; \quad (2.2)$$

для закаленных чугунов по формуле

$$f = 0,94 - 0,0005t - 0,0556v; \quad (2.3)$$

для шлифованных стальных и шлифованных закаленных чугунов по формуле

$$f = 0,82 - 0,0005t - 0,0556v, \quad (2.4)$$

где  $v$  — окружная скорость вращения валков, м/с;  $t$  — температура прокатки, °С. Приведенные формулы применимы для  $t > 700$  °С,  $v < 5$  м/с.

В зависимости от прокатываемого материала и температуры прокатки значение коэффициента трения при захвате заготовки валками может быть выбрано из таблицы 2.2.

Таблица 2.2

Значения коэффициента трения при захвате заготовки валками

Прокатываемый материал	Температура прокатки $t$ , °С	Коэффициент трения $f$
Медь	900	0,52
Латунь Л62	800	0,45
Латунь Л68	800	0,38
Мельхиор МН19	950	0,40
Никель	1 100	0,40

Следует отметить, что коэффициенты трения при установившемся процессе прокатки имеют существенно меньшие значения, чем при захвате валками заготовки. Поэтому, при большой степени обжатия существует возможность пробуксовывания валков относительно прокатываемой заготовки. Например, при прокатке стали, нагретой до температуры 1 000...1 200 °С  $f/f_{\text{бвкс}} = 1,25...2,0$ .

Таким образом, степень обжатия заготовки при прокатке в значительной степени определяется углом захвата или коэффициентом трения между валками и заготовкой. Для его увеличения на поверхность валков наносят риски, рифления, специальные наплавочные валики, повышая тем самым допустимую величину абсолютного обжатия.

Степень деформации при прокатке характеризуется следующими показателями: обжатием (абсолютным и относительным), уширением (абсолютным и относительным) и коэффициентом вытяжки.

Обжатие (абсолютное  $\Delta h$  и относительное  $\varepsilon$ ) определяется, как

$$\Delta h = h_0 - h_1, \quad \varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} 100\%, \quad (2.5)$$

где  $h_0, h_1$  — соответственно начальная и конечная высота заготовки.

Уширение (абсолютное  $\Delta b$  и относительное  $\theta$ ) определяется, как

$$\Delta b = b_1 - b_0, \quad \theta = \frac{b_1 - b_0}{b_0} 100\%, \quad (2.6)$$

где  $b_0, b_1$  — соответственно начальная и конечная ширина заготовки.

Площадь поперечного сечения прокатываемой заготовки всегда уменьшается. Поэтому для определения деформации (особенно когда обжатие по сечению различно) используют показатель, называемый *вытяжкой или коэффициентом вытяжки*  $\lambda$ , который определяется по формуле

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{F_0}{F_1}, \quad (2.7)$$

где  $l_0, F_0$  — длина и площадь поперечного сечения заготовки до прокатки,  $l_1, F_1$  — после прокатки.

Величина вытяжки обычно составляет 1,1...1,6 за проход, но может быть и больше.

**Продукция прокатного производства.** Продукция прокатного производства широко применяется в народном хозяйстве: непосредственно в конструкциях мостов, зданий, железнодорожных путей, станинах машин и т. д. (машиностроительные профили), в качестве заготовок для изготовления деталей в механических цехах, а также заготовок дляковки и штамповки (машиностроительные заготовки).

Форма поперечного сечения прокатанного изделия называется его *профилем*. Совокупность различных профилей разных размеров называется *сортаментом*.

Сортамент прокатываемых профилей разделяют на пять основных групп: сортовой прокат, фасонный прокат, листовой прокат, трубы и специальные виды проката (рис. 2.11).

К **сортовому** относится прокат, у которого касательная к любой точке контура поперечного сечения не пересекает данное сечение (прокат круглый, квадратный, шестигранный, полосовой и др.) (рис. 2.11, *а*).

К **фасонному** относится прокат, у которого касательная хотя бы к одной точке контура поперечного сечения пересекает данное сечение (балка, швеллер, уголок и профили специального назначения) (рис. 2.11, *б*).

**Листовой** прокат подразделяют на толстолистовой (4...160 мм) и тонколистовой (0,2...4 мм). Листы толщиной менее 0,2 мм называются фольгой.

**Трубы** разделяют на бесшовные (диаметром 30...650 мм) и сварные (диаметром 10...1420 мм).

К **специальным видам** проката относят периодические профили (рис. 2.11, *в*), шары, колеса, кольца, зубчатые колеса и т. п.

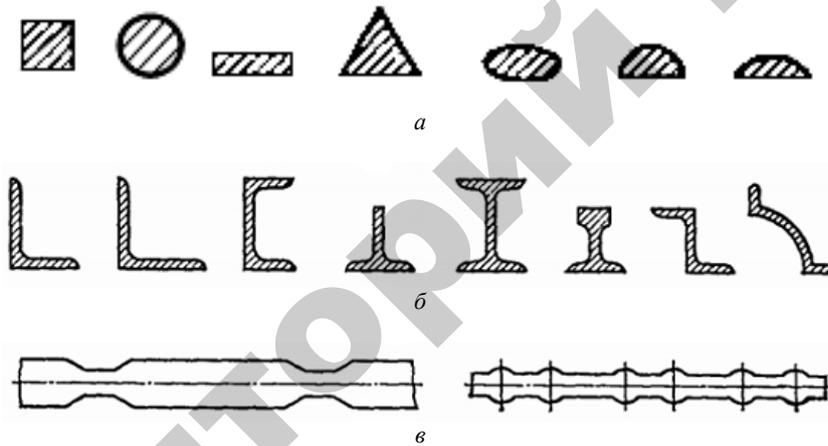


Рис. 2.11. Продукция прокатного производства: *а* — профили сортового проката; *б* — профили фасонного проката; *в* — периодические профили

**Виды прокатки.** Различают три основных вида прокатки: продольную, поперечную и поперечно-винтовую (рис. 2.12).

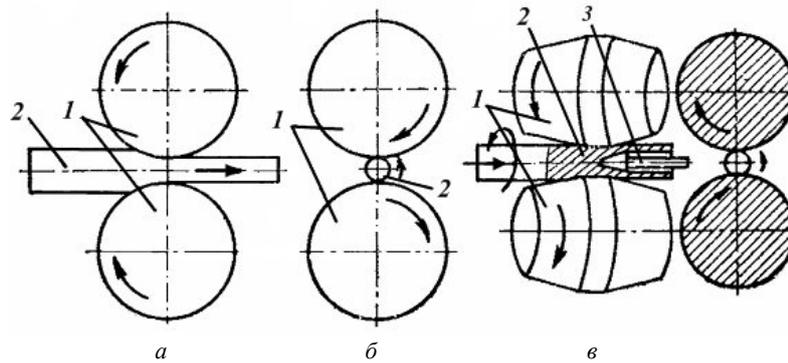


Рис. 2.12. Схемы основных видов прокатки: а — продольная; б — поперечная; в — поперечно-винтовая; 1 — валки; 2 — заготовка; 3 — оправка

При **продольной** прокатке заготовка деформируется между двумя валками, вращающимися в разные стороны, и перемещается перпендикулярно осям валков (рис. 2.12, а). Продольной прокаткой получают сортовой и листовой прокат.

При **поперечной** прокатке валки вращаются в одном направлении и сообщают заготовке круглого сечения при деформировании движение (вращательное — в противоположном направлении и поступательное — вдоль оси валков) (рис. 2.12, б). Данным способом производят изделия, представляющие собой тела вращения (шары, оси, шестерни и др.), накатывают зубья шестерен.

При **поперечно-винтовой** прокатке валки установлены под некоторым углом ( $6...12^\circ$ ) друг к другу и вращаются в одном направлении (рис. 2.12, в). В момент соприкосновения металла с вращающимися валками заготовка втягивается в сужающуюся щель и деформируется. Поперечно-винтовая прокатка была изобретена в 1885 г. братьями Маннесманн. Она является основной операцией при производстве бесшовных труб и применяется для прошивки заготовки в гильзу (толстостенную трубу), раскатки гильзы в трубу, калибровки и правки труб. Поперечно-винтовую прокатку также широко применяют для получения изделий с переменным по длине сечением.

**Инструмент и оборудование для прокатки.** В качестве инструмента для прокатки применяют **валки прокатные**, конструкция которых представлена на рисунке 2.13. В зависимости от прокатываемого профиля валки могут быть *гладкими* (рис. 2.13, *а*), применяемыми для прокатки листов, лент и т. п., и *калиброванными* (ручьевыми) (рис. 2.13, *б*) для получения сортового и фасонного проката.

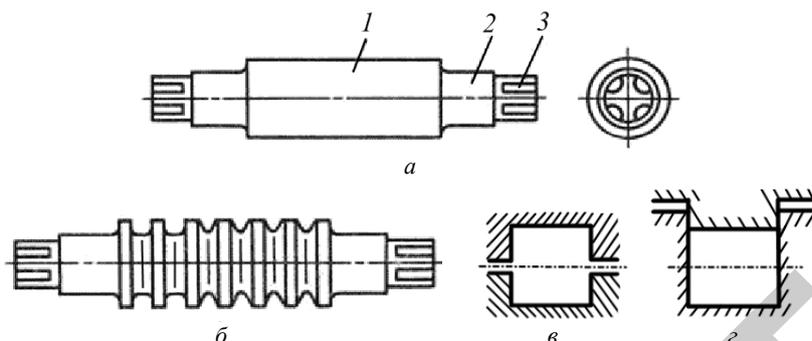


Рис. 2.13. Прокатные валки: *а* — гладкий; *б* — калиброванный; *в* — открытый калибр; *z* — закрытый калибр

Валки состоят из бочки (рабочая часть валка) *1*, шеек-цапф *2* и трефы *3* (рис. 2.13, *а*). Шейки валков вращаются в подшипниках, которые у одного из валков могут перемещаться специальным нажимным механизмом для изменения расстояния между валками и регулирования взаимного расположения осей. Трефа, которая представляет собой крестообразные концы, предназначена для соединения валка с муфтой или шпинделем.

Ручьем называют вырез на боковой поверхности валка, а совокупность двух ручьев пары валков образует полость, называемую *калибром*. Калибры различают открытые и закрытые (рис. 2.13, *в*, *z*). У открытых калибров линия разъема валков находится в пределах калибра, у закрытых — вне его пределов. На каждой паре ручьевых валков обычно размещают несколько калибров. Калибры, предназначенные для уменьшения сечения прокатываемого металла, называют обжимными или вытяжными.

Комплект прокатных валков со станиной называется *рабочей клетью*. Совокупность привода, шестеренной клетки, рабочих клетей (одной или нескольких) называется **прокатным станом** (рис. 2.14).

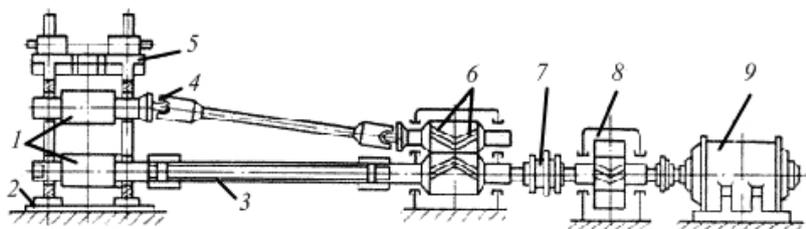


Рис. 2.14. Схема прокатного стана: 1 — прокатные валки; 2 — плита; 3 — торефовый шпиндель; 4 — универсальный шпиндель; 5 — рабочая клетка; 6 — шестеренная клетка; 7 — муфта; 8 — редуктор; 9 — двигатель

Прокатные станы классифицируются по трем признакам:

- 1) по числу и расположению валков в рабочей клетке;
- 2) по числу и взаимному расположению рабочих клеток;
- 3) по роду выпускаемой продукции.

В зависимости от числа и расположения валков в рабочей клетке прокатные станы подразделяются на двухвалковые (дуо-станы), трехвалковые (трио-станы), четырехвалковые (кварто-станы), многовалковые и универсальные (рис. 2.15).

**Двухвалковые станы** (рис. 2.15, а) подразделяются на нереверсивные (валки вращаются только в одну сторону), применяемые

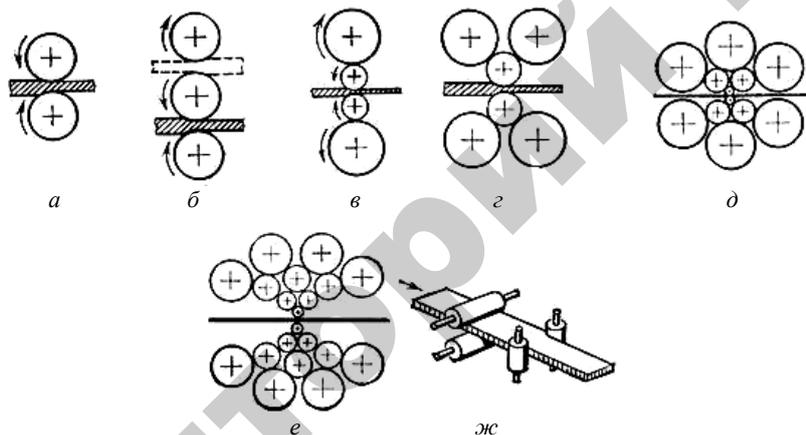


Рис. 2.15. Классификация прокатных станов в зависимости от числа и расположения валков в рабочей клетке: а — двухвалковые; б — трехвалковые; в — четырехвалковые; г, д, е — многовалковые; ж — универсальные

для прокатки сортового металла, проволоки и тонких листов, и реверсивные (валки могут изменять направление вращения), которые применяют для прокатки крупных слитков, толстых листов и массивных профилей.

**Трехвалковые станы** (рис. 2.15, б) являются нереверсивными. Прокатка на таких станах производится между нижним и средним валками в одном направлении (вперед) и между верхним и средним валками в обратном направлении (назад).

**Четырехвалковые станы** (рис. 2.15, в) имеют четыре валка, расположенные друг над другом, из них два рабочих валка меньшего диаметра и два опорных — большего диаметра.

**Многовалковые станы** (рис. 2.15, г, д, е) имеют от шести до двадцати и более валков. Обычно рабочие валки малого диаметра не имеют привода, их вращение обеспечивается за счет сил трения от промежуточных приводных валков, которые, в свою очередь, опираются на опорные.

**Универсальные станы** (рис. 2.15, ж), кроме горизонтальных валков, имеют также и вертикальные (расположенные с одной или обеих сторон горизонтальных валков), обеспечивающие дополнительное обжатие металла в поперечном направлении.

По числу и взаимному расположению рабочих клетей станы разделяют на одноклетевые и многоклетевые (рис. 2.16).

**Одноклетевой стан** (рис. 2.16, а) имеет одну рабочую клеть и линию привода валков. К одноклетевым станам относятся блюминги, слябинги, толстолистовые дуо- и трио-станы, трубопрокатные и универсальные станы.

**Многоклетевые станы** имеют две и более клетки. Расположение клеток может быть линейным, ступенчатым и непрерывным (полунепрерывным).

В *линейных станах* рабочие клетки расположены на одной линии (рис. 2.16, б). К линейным станам относятся рельсобалочные и крупносортовые станы.

В *ступенчатых станах* (рис. 2.16, в) рабочие клетки расположены в нескольких линиях (с двумя и более числом ступеней). Такое расположение имеют сортовые станы.

В *непрерывных станах* прокат движется прямолинейно и деформируется одновременно в нескольких клетях. Непрерывные станы делятся на станы с групповым приводом (рис. 2.16, г)

и с индивидуальным приводом (рис. 2.16, д). На рисунке 2.16, е представлена схема *полунепрерывного* стана. Непрерывные и полунепрерывные станы применяют в качестве заготовочных, проволочных, полосовых и листовых.

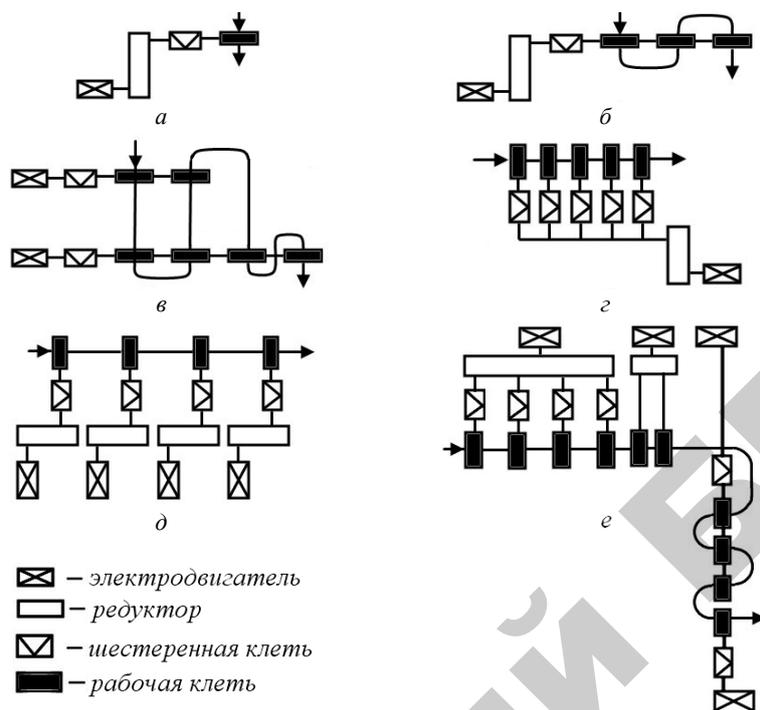


Рис. 2.16. Классификация прокатных станов по расположению и числу рабочих клеток: а — одноклетевой; б — многоклетевой линейный; в — ступенчатый; г — непрерывный с групповым приводом; д — непрерывный с индивидуальным приводом; е — полунепрерывный

По роду выпускаемой продукции станы делятся на обжимные, заготовочные, сортовые, рельсобалочные, проволочные, листопркатные, трубопрошивные и станы для специальных видов проката.

**Обжимные станы** предназначены для обжатия стальных слитков (массой до 60 т) и цветных металлов (массой до 10 т) в крупные заготовки (блюмы и слябы). К обжимным станам относятся блюминги и слябинги с диаметром валков 800...1 400 мм.

На блюмингах получают заготовку квадратного сечения (блюм) с размерами от 450×450 до 150×150 мм, подвергаемую дальнейшей прокатке для получения сортовых и фасонных профилей. На слябингах производят прокат прямоугольного сечения (слябы) толщиной 65...300 мм и шириной 600...1 600 мм), который представляет собой заготовки для листа. Блюминг — мощный реверсивный дуо-стан, слябинг — мощный универсальный реверсивный двухклетьевого стан (первая клеть — вертикальные валки, вторая — горизонтальные).

**Заготовочные станы** имеют валки диаметром 450...850 мм. На них прокатывают блюмы в сортовую квадратную заготовку сечением до 200×200 мм и слябы в плоскую заготовку (сутунку) сечением меньше, чем слябы. Эти станы являются станами непрерывного действия.

**Сортовые станы** предназначены для получения из блюмов сортового и фасонного проката: круглого и квадратного диаметром (стороной квадрата) от 8 до 150 мм, балок и швеллеров высотой 50...200 мм, уголков сечением от 20×20 до 200×200 мм, рельсов узкой колеи. Эти станы делятся на крупносортовые (диаметр валков 500...700 мм), среднесортовые (диаметр валков 350...500 мм) и мелкосортовые (диаметр валков 250...350 мм). Расположение клетей в сортовых станах может быть различное.

На заготовочных и сортовых станах заготовка последовательно проходит через ряд калибров. Разработку системы прокатки и размещения калибров, обеспечивающих получение заданного профиля проката при минимальном числе проходов, называют **калибровкой валков**. Одной из основных задач калибровки является расчет режима обжатия при прокатке. По назначению калибры прокатных станов разделяются на обжимные (или вытяжные), черновые (или подготовительные) и чистовые (или отделочные).

**Обжимные калибры** предназначены для уменьшения сечения прокатываемого металла. Чаще всего они имеют прямоугольную (в том числе квадратную), ромбическую и овальную формы.

В **черновых калибрах** уменьшается площадь и изменяется форма поперечного сечения прокатываемого металла (с постепенным их приближением к соответствующим параметрам готового изделия).

В **чистовых калибрах** учтены коэффициент линейного расширения и допуски на размеры прокатываемого профиля.

Исходя из технико-экономических показателей, для прокатки одного профиля можно применить различные схемы калибровки. Например, при прокатке квадратного и круглого профиля наиболее часто используют следующие системы калибров: «ромб – квадрат», «овал – квадрат» или «овал – круг». При передаче заготовки из ручья в ручей для улучшения обжатия ее кантуют на  $90^\circ$ .

На сортовых станах заготовка после нагрева в печах последовательно проходит прокатку в 7...15 калибрах. В последнем из них и получают требуемый профиль (рис. 2.17). После резки полученный профиль охлаждают, правят в холодном состоянии, производят термическую обработку.

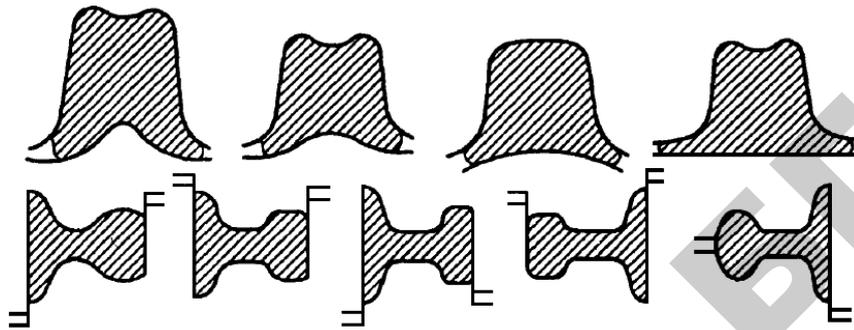


Рис. 2.17. Последовательность проката рельса узкой колеи на сортовом стане

**Рельсобалочные станы** предназначены для прокатки из блюмов рельсов широкой колеи, крупных балок, швеллеров и других профилей.

**Проволочные станы** предназначены для прокатки проволоки диаметром 5...10 мм (проволоку меньшего диаметра получают волочением).

**Листопрокатные станы** делятся на толстолистовые и тонколистовые.

Процесс прокатки *толстых листов* состоит из двух стадий:

- 1) раскатка сляба в поперечном направлении до получения необходимой ширины;
- 2) прокатка по длине сляба (после достижения им необходимой ширины и поворота прокатываемой полосы на  $90^\circ$ ).

Тонколистовую сталь обычно получают путем прокатки (горячей и холодной). Горячая прокатка осуществляется на полунепрерывных и непрерывных станах. На них из слябов прокатывают листы шириной 600...2 200 мм и более и толщиной 1,2...12 мм.

После горячей прокатки рулоны травятся и затем поступают на станы холодной прокатки. Прокатка ведется со смазкой и охлаждением валков. Для снятия наклепа применяют промежуточный отжиг.

Для холодной прокатки применяют реверсивные многоклетневые четырехвалковые станы.

**Трубопрошивные станы** применяют для производства бесшовных труб. Для этого используются установки, состоящие из прошивного и пилигримового станов.

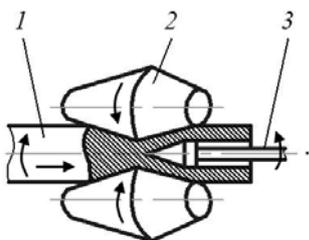


Рис. 2.18. Схема прошивки отверстия на прошивном стане:  
1 — заготовка; 2 — валки;  
3 — прошивень

Прошивку отверстий выполняют на прошивном стане поперечно-винтовой прокатки двумя конусообразными рабочими валками 2, оси которых пересекаются под углом  $6...12^\circ$  (рис. 2.18). В валках такого стана заготовка 1 совершает движение (одновременно вращательное и поступательное) навстречу прошивню 3. При этом в заготовке возникают радиальные растягивающие напряжения, вызывающие течение металла от ее центра к периферии.

В результате этого заготовка сравнительно легко прошивается прошивнем с образованием трубной заготовки (гильзы), которая передается к пилигримовому стану.

Пилигримовый стан (рис. 2.19) состоит из двухвалковой клетки и подающего механизма. Направление вращения валков в этом стане противоположно направлению движения заготовки. Металл обжимается в калибре переменного сечения только за полуоборот валков. За следующий полуоборот заготовка проходит между валками без обжатия. Рабочий процесс прокатки труб на пилигримовом стане состоит в следующем: в поступающую с прошивного стана толстостенную гильзу 1 вставляют оправку 2 подающего механизма (при этом длина оправки больше длины гильзы). Гильза вместе с оправкой перемещается подающим механизмом к валкам. Как только

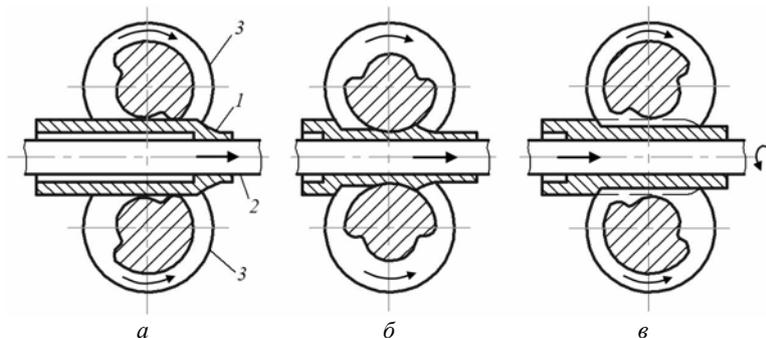


Рис. 2.19. Схема процесса прокатки на пилигримовом стане: 1 — гильза; 2 — оправка; 3 — валки

гильза достигает валков 3, выступ калибра захватывает ее часть (рис. 2.19, а) и обжимает ее своей рабочей частью (рис. 2.19, б). Во время прокатки валки стремятся вытолкнуть гильзу с оправкой назад, но этому препятствует подающий механизм. При этом сам механизм с малой скоростью непрерывно движется вперед. Конец оправки связан с поршнем пневматического цилиндра. После полуоборота валков гильза выходит из рабочей части калибра и становится свободной. В течение следующего полуоборота приведенный в движение поршень толкает вперед оправку с гильзой, которые при этом движении поворачиваются относительно их продольной оси на  $90^\circ$  (рис. 2.19, в), и затем валки захватывают новую часть гильзы. Подающий механизм в течение одного оборота валков перемещается вперед на расстояние от 8 до 25 мм. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет прокатана вся гильза. По окончании прокатки валки разводят, и подающий механизм обратным ходом вытягивает оправку из трубы. Освобожденная труба отводится задним рольгангом к горячей пиле, где отрезают так называемую пильгерную головку.

**Станы для специальных видов проката.** Периодические профили, у которых поперечное сечение заготовки изменяется по определенному закону (это изменение обычно периодически повторяется по длине), получают различными методами: продольной, поперечной и поперечно-винтовой прокаткой.

При продольной прокатке калибры между двумя валками выполняются таким образом, чтобы за один полный оборот валков

окончательно формировался один профиль на непрерывно прокатываемой заготовке, за два оборота — два и т. д. При такой прокатке длина одного профиля определяется длиной наружной окружности валка.

Поперечная прокатка периодических профилей отличается от продольной прокатки тем, что заготовка и готовый профиль представляют собой тела вращения. Наиболее перспективным станом для поперечной прокатки профилей является трехвалковый (рис. 2.20). Прокатка на данном стане осуществляется цилиндрическими или коническими валками, расположенными в рабочей клетке стана под углом  $120^\circ$  друг к другу. Каждый валок может перемещаться вдоль своей оси под действием индивидуального гидравлического цилиндра (перемещение автоматически происходит одновременно на одинаковую величину для всех валков).

Валки могут быть установлены с некоторым перекосом друг относительно друга. При этом три приводных валка 1 вращают заготовку 2, которая принудительно перемещается с помощью зажимного патрона 3 в осевом направлении. Во время прокатки валки могут сближаться и расходиться на требуемое расстояние с помощью гидравлической следящей системы (в соответствии с профилем копировальной линейки) или системы ЧПУ (по заранее заданной программе). Переход от одного профиля к другому осуществляется без замены валков за счет смены копира или программы.

Для прокатки стальных шаров диаметром 25...125 мм применяют станы поперечно-винтовой прокатки. Схема прокатки представлена на рисунке 2.21.

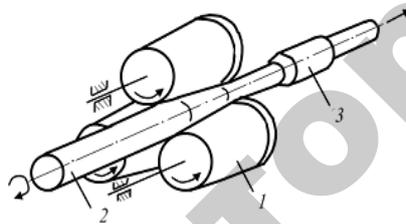


Рис. 2.20. Схема поперечной прокатки на трехвалковом стане

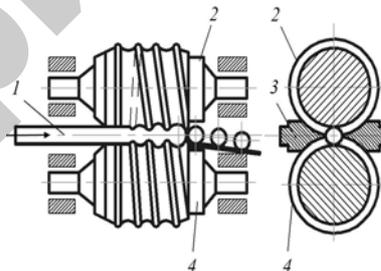


Рис. 2.21. Схема прокатки шаров

Валки 2 к 4 вращаются в одном направлении. В результате этого заготовка 1 получает вращательное движение. Для осевого перемещения оси валков располагают под углом к оси вращения. От вылета из валков заготовка предохраняется центрирующими упорами 3. В валках нарезаны винтовые калибры. По характеру деформации калибр разделяется на формующий участок, где осуществляется захват заготовки и ее постепенное обжатие в шар, и отделочный участок, где шару придаются точные размеры и происходит его отделение от заготовки. Диаметр валков в 5...6 раз превышает диаметр прокатываемых шаров и составляет 190...700 мм. Производительность стана составляет 2 000...14 000 шаров в час (в зависимости от их диаметра).

Существуют и другие станы специального назначения. Например, двухвалковые станы для прокатки шестерен, станы для накатки резьбы, для прокатки ребристых труб и пр.

Особой разновидностью специальных станов являются роликогибочные станы. На них гнутые фасонные профили (рис. 2.22) получают в результате гибки полос в холодном состоянии. Для получения сложных профилей применяются многоклетевые роликогибочные станы, имеющие 6...20 клеток (и более) в одной линии. В отличие от прокатки при прохождении через каждую клетку площадь поперечного сечения полосы не изменяется, а изменяется только ее форма.

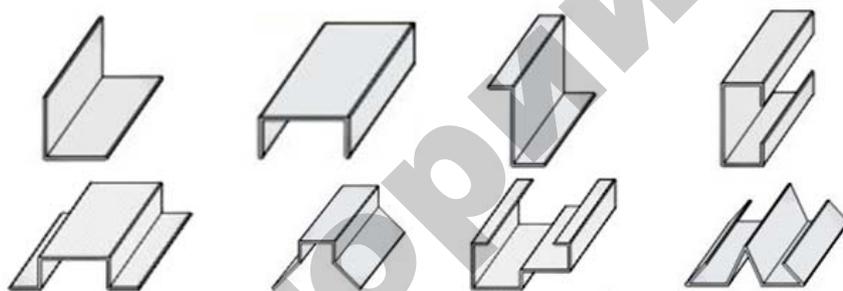


Рис. 2.22. Гнутые фасонные профили

Некоторые виды продукции, выпускаемой в прокатном производстве, представлены на рисунке 2.23.



Рис. 2.23. Виды продукции прокатного производства: *а* — прокат круглый; *б* — прокат шестигранный; *в* — уголок равнополочный; *г* — швеллеры; *д* — двутавры; *е* — трубы; *ж* — арматура периодического профиля; *з* — зубчатые колеса; *и* — шары мелющие для шаровых мельниц

## 2.2. Прессование металлов

**Прессование** — вид горячей ОМД, при котором металл выдавливается из замкнутого объема (контейнера) через отверстие в матрице (рис. 2.24). Профиль прессованного изделия соответствует профилю сечения отверстия матрицы.

Различают два способа прессования: прямое и обратное.

При **прямом прессовании** направление течения металла совпадает с направлением движения пуансона (рис. 2.24, *а*). Заготовку *1* помещают в полость контейнера *7* и с помощью усилия прессы, действующего на пуансон *5* и пресс-шайбу *6*, выдавливают металл через отверстие в матрице *4*, закрепленной в держателе матрицы *2*.

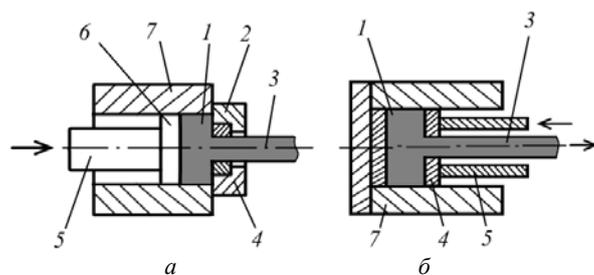


Рис. 2.24. Схема процесса прессования: а — прямое прессование; б — обратное прессование: 1 — заготовка; 2 — держатель матрицы; 3 — изделие; 4 — матрица; 5 — пуансон; 6 — пресс-шайба; 7 — контейнер

При **обратном прессовании** направление течения металла противоположно направлению движения пуансона (рис. 2.24, б). В закрытый с одной стороны контейнер 7 последовательно размещаются заготовка 1 и матрица 4. С помощью усилия прессы, действующего на полый пуансон 5 и матрицу 4, металл выдавливается через отверстия в матрице и пуансоне.

При прямом прессовании требуется прикладывать значительно большее усилие, поскольку часть его затрачивается на преодоление сил трения при перемещении металла заготовки внутри контейнера. Поэтому значительная часть металла заготовки не может быть выдавлена из контейнера. Остающаяся часть металла (пресс-остаток) составляет обычно 18...20 % от массы заготовки (в некоторых случаях — 30...40 %). Преимуществом этого вида прессования является простота его схемы.

По сравнению с прямым усилие при обратном прессовании на 25...30 % меньше, а пресс-остаток составляет 5...6 %. Однако сложность конструкции прессы и ограниченность размеров получаемых изделий по длине препятствуют широкому применению способа обратного прессования.

Методом прессования изготавливают сплошные и полые профили (рис. 2.25). При этом в заготовке необходимо предварительно получить сквозное отверстие. Часто отверстие в заготовке прошивают на том же прессе, на котором получают окончательное изделие (профиль). В процессе прессования при движении пуансона 1 с пресс-шайбой 5 металл заготовки 2 выдавливается в зазор между матрицей 3 и иглой 4.

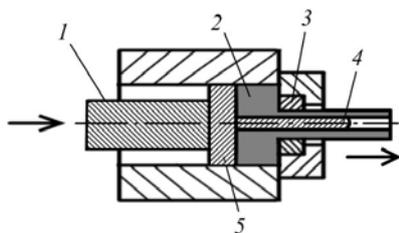


Рис. 2.25. Схема прессования полого профиля: 1 — пуансон; 2 — заготовка; 3 — матрица; 4 — игла; 5 — пресс-шайба

профилей. Поэтому, как правило, заготовку предварительно обрабатывают на станке, а после нагрева ее поверхность тщательно очищают от окалины.

**Инструмент для прессования** — это контейнеры, матрицы, пресс-шайбы, иглы, которые работают при больших удельных давлениях (до 1 500 МПа) и высоких температурах. Температурный интервал прессования цветных металлов составляет 500...900 °С, а сталей, никелевых и титановых сплавов — 1 000...1 250 °С. Поэтому для изготовления инструмента применяют материалы с повышенными жаростойкостью и прочностными характеристиками (высококачественные легированные инструментальные стали ХНВ, 5ХНМ, твердый сплав ВК8 и др.). В этой связи стоимость комплекта инструмента для получения пустотелых профилей иногда достигает 15 % от стоимости прессового оборудования.

Для увеличения срока службы инструмента на поверхность заготовки наносят технологические смазки. Помимо повышения срока службы инструмента, их использование приводит к снижению усилия деформирования, уменьшению неравномерности течения металла и повышению качества поверхности прессуемых изделий.

Выбор состава смазки зависит от обрабатываемого материала. В состав смазки может входить графит, добавляемый в минеральные масла, канифоль и т. п. Для стали, сплавов никеля и титана, прессование которых осуществляют при высоких температурах, в качестве смазки применяют стекло.

Исходными заготовками при прессовании являются слитки или прокат из углеродистых и легированных сталей, а также из цветных металлов (медь, алюминий, магний, титан, цинк, никель, цирконий, уран, торий) и сплавов на их основе.

Состояние поверхности заготовки оказывает значительное влияние на качество поверхности и точность прессованных

**Оборудование для прессования** — это горизонтальные и вертикальные гидравлические прессы (усилие — 3...250 МН, рабочее давление жидкости — до 40 МПа). Горизонтальные гидравлические прессы являются наиболее приемлемыми, поскольку позволяют получать изделия неограниченной длины.

**Технологический процесс прессования** включает следующие операции:

1) подготовка заготовки к прессованию (разрезка, предварительное обтачивание);

2) нагрев заготовки с последующей очисткой от окалины и нанесение смазки;

3) размещение заготовки в контейнере, установка матрицы, пуансона, пресс-шайбы и иглы;

4) непосредственное прессование;

5) отделка изделия (отделение пресс-остатка, разрезка, зачистка, термическая обработка и т. п.).

Процесс прессования характеризуется: коэффициентом вытяжки, степенью деформации и скоростью истечения металла из отверстия матрицы.

*Коэффициент вытяжки*  $\lambda$  (отношение площади сечения контейнера  $F_k$  к площади сечения всех отверстий матрицы  $F_m$ ) определяется по формуле

$$\lambda = \frac{F_k}{F_m}. \quad (2.8)$$

Обычно коэффициент вытяжки  $\lambda$  при прессовании стали составляет 8...80, а для меди, алюминия и некоторых сплавов цветных металлов — 450...700.

*Степень деформации*  $\epsilon$  определяется по формуле

$$\epsilon = \frac{F_k - F_m}{F_k} 100\%. \quad (2.9)$$

При прессовании она может составлять 95 %.

*Скорость истечения металла*  $v_n$  из отверстия матрицы пропорциональна коэффициенту вытяжки  $\lambda$  и определяется по формуле

$$v_{\text{и}} = \lambda v_{\text{п}} = \frac{F_{\text{к}}}{F_{\text{м}}} v_{\text{п}}, \quad (2.10)$$

где  $v_{\text{п}}$  — скорость прессования, т. е. скорость движения пуансона и пресс-шайбы.

При прессовании медных труб скорость истечения металла составляет 1,2...5 м/с, алюминиевых прутков — 25 м/с, стальных — 6...8 м/с. Малопластичные материалы (например, сплавы магния) прессуются со скоростью истечения 0,015...0,05 м/с. Превышение указанных скоростей истечения металла приводит к образованию поперечных трещин и разрывов.



Рис. 2.26. Профили изделий, получаемых прессованием

Изделия, получаемые прессованием, могут иметь разнообразные профили (рис. 2.26). Следует отметить, что некоторые из них получить другими способами невозможно. При этом точность и чистота поверхности прессованных изделий выше, чем у изделий, полученных методом прокатки.

Прессованием изготавливают изделия различного сортамента из цветных металлов и сплавов, в том числе прутки диаметром 3...250 мм, трубы диаметром 20...400 мм со стенками толщиной 1,5...12 мм и другие профили (рис. 2.27). Из углеродистых сталей 20, 35, 45, 50, конструкционных 30ХГСА, 40ХН, коррозионно-стойких 12Х18Н10Т и других высоколегированных сталей прессуют трубы с внутренним диаметром 30...160 мм с толщиной стенки 2...10 мм, профили толщиной 2...2,5 мм и линейными размерами поперечных сечений до 200 мм.

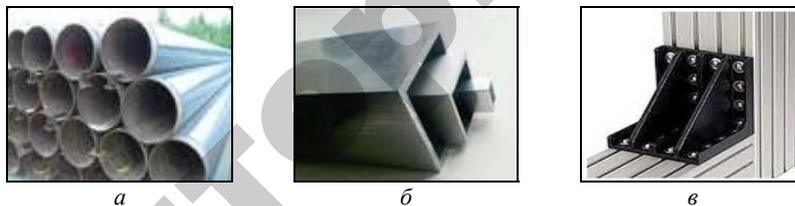


Рис. 2.27. Виды продукции из алюминиевых сплавов, полученной прессованием: а — трубы; б — стандартные профили общего назначения — квадрат; в — специальные конструкционные профили

К *преимуществам* процесса прессования относятся следующие:

- 1) возможность получения изделий из металлов и сплавов с низкой пластичностью, которые невозможно получить методом прокатки;
- 2) возможность получения профилей сложного поперечного сечения;
- 3) изготовление широкого сортамента изделий на одном и том же прессовом оборудовании (заменяются только матрицы);
- 4) высокая производительность процесса.

*Недостатками* процесса прессования являются следующие:

- 1) повышенный расход металла из-за потерь в виде прессостатка и высокая энергоемкость процесса;
- 2) неравномерность (в некоторых случаях) механических свойств по длине и поперечному сечению изделия;
- 3) высокая стоимость и низкая стойкость прессового инструмента.

### 2.3. Волочение металлов

**Волочение** — вид ОМД, заключающийся в протягивании заготовок через постепенно сужающееся отверстие в специальном инструменте, называемом волокой или фильерой (рис. 2.28). Волочение осуществляется, главным образом, в холодном состоянии. При волочении длина заготовки увеличивается, а поперечное сечение уменьшается, приобретая форму отверстия.

Волочением получают сплошные и полые профили (рис. 2.29). Волочение труб можно выполнять без оправки (для уменьшения внешнего диаметра) и с оправкой (для уменьшения как внешнего диаметра, так и толщины стенки). На рисунке 2.30 показана схема волочения трубы 1 на длинной закрепленной оправке 3. В этом случае профиль полу-

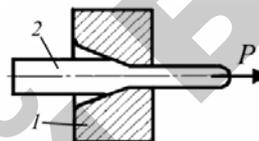


Рис. 2.28. Схема волочения прутка: 1 — волока; 2 — заготовка



Рис. 2.29. Профили, получаемые волочением

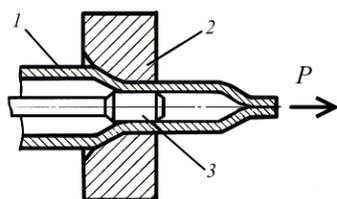


Рис. 2.30. Схема волочения трубы: 1 — заготовка трубы; 2 — волока; 3 — оправка

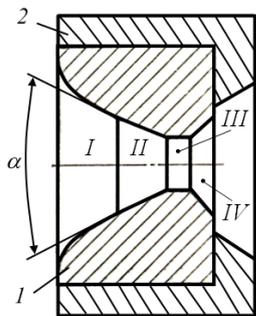


Рис. 2.31. Конструкция волоки: 1 — волока; 2 — обойма

ученной трубы определяется зазором между волокой 2 и оправкой 3.

Основной инструмент при волочении — волоки различной конструкции. Конструкция волоки представлена на рисунке 2.31. Отверстие волоки имеет сложную конфигурацию и состоит из четырех основных зон: смазывающей зоны I, деформирующей зоны II, калибрующей зоны III и выходной зоны IV. Калибрующую зону обычно выполняют цилиндрической формы, а остальные — конической. Угол рабочего конуса  $\alpha$  деформирующей зоны зависит от твердости обрабатываемого материала, от сечения заготовки, а также от коэффициента контактного трения. Этот угол составляет для прутков  $6...18^\circ$ , для труб —  $10...24^\circ$ . Ширина цилиндрического пояса калибрующей зоны обычно равна  $2...10$  мм.

Исходными материалами при волочении являются горячекатаные прутки, сортовой прокат, проволока и трубы из сталей, цветных металлов и сплавов.

Волоки работают при больших напряжениях, которые сочетаются с износом при протягивании. Поэтому для волочения прутков и труб больших размеров волоки изготавливают из инструментальных сталей (У10, У12, ШХ15, Х12М и др.), для получения проволоки диаметром менее  $0,6$  мм — из твердых сплавов (ВК3, ВК6, ВК8, ВК10, ВК15) и технических алмазов.

Для уменьшения трения в волоке заготовки смазывают минеральным маслом, эмульсией или графитом. Смазка способствует получению чистой поверхности изделия и снижению усилий, затрачиваемых на волочение.

Процесс волочения осуществляют, как правило, при комнатной температуре. Выделяющееся при деформации металла тепло отводят непрерывным охлаждением волоки эмульсией, водой или воздухом. В процессе волочения металл наклепывается и приобретает волокни-

стое строение (текстуру). Это приводит к изменению механических свойств металла. Так, при волочении стальной проволоки, содержащей 0,5 % С, со степенью деформации до 80 % предел прочности при растяжении  $\sigma_b$  увеличивается с 900 до 1 480 МПа.

**Оборудованием для волочения** являются волочильные станы, которые, в основном, подразделяются на барабанные и цепные.

**Барабанные станы** (рис. 2.32) применяются для волочения проволоки, а также труб небольшого диаметра, наматываемых в бухты. Исходную заготовку бухты укладывают па вертушку 1. Предварительно заостренный конец проволоки пропускается через отверстие волоки 2 и закрепляется на барабане 3, который приводится во вращение от электродвигателя через редуктор и зубчатую передачу 4. Кроме станов для однократного волочения существуют станы и для многократного волочения, которые имеют до 20 барабанов с установленными перед ними волоками.

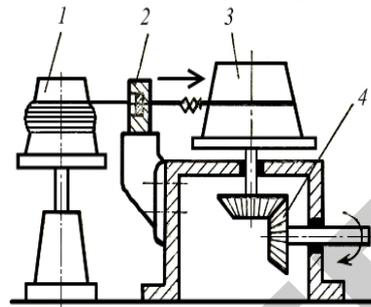


Рис. 2.32. Схема барабанного волочильного стана: 1 — вертушка; 2 — волока; 3 — барабан; 4 — привод

**Цепные станы** с прямолинейным движением тянущего устройства (рис. 2.33) применяют для волочения прутков и труб, которые не могут наматываться в бухты. На этом стане через отверстие волоки 1 пропускают конец прутка и захватывают его клещами 2, которые закреплены на каретке 3. Каретка через тяговый крюк 4 перемещается пластинчатой цепью 5, приводимой в движение от звездочки 6, которая вращается от электродвигателя 8 через редуктор 7.

**Технологический процесс волочения** включает следующие операции:

- 1) предварительный отжиг заготовок для получения мелкозернистой структуры металла и повышения его пластичности;
- 2) удаления окалины с поверхности заготовки;
- 3) непосредственное волочение;
- 4) рекристаллизационный отжиг для устранения наклепа;
- 5) отделка готовой продукции (обрезка концов, правка, и др.).

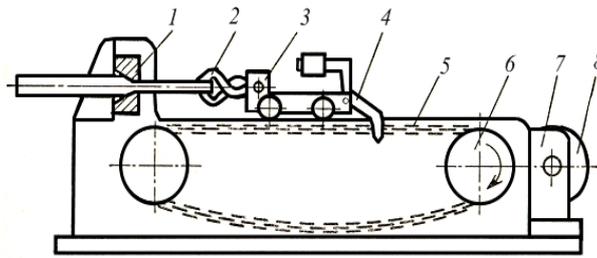


Рис. 2.33. Схема цепного волоочильного стана:  
 1 — волока; 2 — клещи; 3 — каретка; 4 — тяговый крюк; 5 — пластинчатая цепь;  
 6 — звездочка; 7 — редуктор; 8 — электродвигатель

Процесс волочения характеризуется: коэффициентом вытяжки, степенью деформации и скоростью волочения.

*Коэффициент вытяжки*  $\lambda$  (отношение площади поперечного сечения исходной заготовки  $F_0$  к площади заготовки после волочения  $F_k$ ) определяется по формуле

$$\lambda = \frac{F_0}{F_k} = \frac{d_0^2}{d_k^2}, \quad (2.11)$$

где  $d_0, d_k$  — диаметр заготовки до волочения и после него соответственно.

*Степень деформации (степень обжатия)*  $\varepsilon$  определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100 \% = \frac{d_0^2 - d_k^2}{d_0^2} 100 \%. \quad (2.12)$$

Как правило, коэффициент вытяжки  $\lambda$  составляет 1,25...1,45, а степень деформации — 30...35 % (за один проход). При необходимости получить большую величину степени деформации производят многократное волочение. В этом случае полученный в процессе предыдущих операций наклеп снимают отжигом. Затем проводят все подготовительные операции и повторяют процесс до получения изделия нужного сечения.

*Скорость волочения*  $v_b$  — скорость прохождения металла через отверстие в волоке. Чем больше скорость волочения, тем выше произ-

водительность оборудования. Скорость определяется, главным образом, возможностью отвода тепла и допустимой температурой металла при волочении. Скорость волочения на цепных станах при обработке относительно коротких прутков (5...8 м) составляет 0,03...0,65 м/с, при волочении длинных прутков — 1,5...2 м/с. Скорость волочения на барабанных станах однократного волочения обычно составляет 0,7...4 м/с, а на станах многократного волочения, имеющих до 30 волок, она может достигать 20 м/с.

Сортамент изделий, изготавливаемых волочением, включает: проволоку диаметром 0,002...10 мм (рис. 2.34, а) и фасонные профили (сегментные, призматические и фасонные шпонки, призматические и фасонные направляющие, шлицевые валики, опорные призмы, ножи и т. д.). Волочением калибруют стальные трубы диаметрами от капиллярных до 500 мм (рис. 2.34, б), а также стальные прутки диаметром 3...150 мм (рис. 2.34, в).

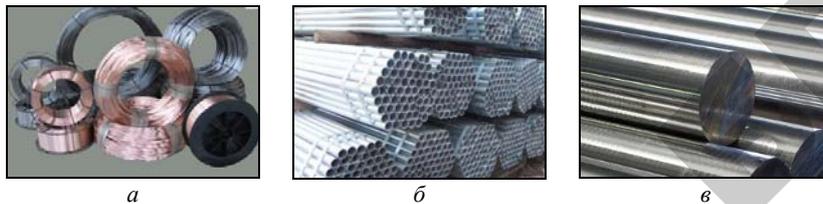


Рис. 2.34. Виды продукции, полученной волочением: а — проволока; б — трубы; в — прутки

Волочение обеспечивает точность размеров (стальная проволока диаметром 1,0...1,6 мм имеет допуск 0,02 мм), высокое качество поверхности, большую степень упрочнения и позволяет получать тонкие профили.

#### Вопросы для самоконтроля

1. Сущность процесса прокатки металлов и ее виды.
2. Продукция прокатного производства.
3. Основные параметры, характеризующие деформацию металла при прокатке.
4. Инструмент для прокатки, его виды и конструктивные элементы.

5. Классификация прокатных станов.
6. Сущность процесса прессования металлов и его виды.
7. Инструмент и оборудование, используемые при прессовании.
8. Основные параметры, характеризующие деформацию металла при прессовании.
9. Сортамент изделий, получаемых прессованием.
10. Сущность процесса волочения.
11. Инструмент и оборудование, используемые при волочении.
12. Основные параметры, характеризующие деформацию металла при волочении.
13. Сортамент изделий, получаемых волочением.

### 3. ПОЛУЧЕНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК

#### 3.1. Виды поковок

**Поковкой** называют заготовку детали, полученную ковкой или объемной штамповкой. Почти каждый машиностроительный завод имеет кузнечные или кузнечно-штамповочные цехи, в которых изготавливают поковки различного назначения. В современном машиностроении около 20 % всех деталей получают из поковок. Ковкой и объемной штамповкой изготавливают заготовки и детали массой от десятков граммов (детали швейных машин) до сотен тонн (поковки роторов турбин) и размерами от нескольких сантиметров до десятков метров. Ковкой и штамповкой могут быть обработаны почти все используемые в промышленности металлы и сплавы.

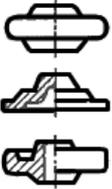
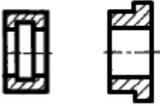
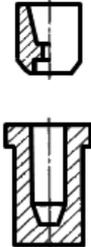
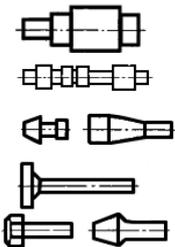
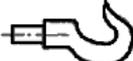
Процессыковки и объемной штамповки приводят к изменению макро- и микроструктуры обрабатываемого металла, улучшающему его качество и свойства. Структура металла становится мелкозернистой, повышаются механические свойства поковок (в частности, показатели прочности, пластичности и вязкости).

Исходными заготовками для получения поковок являются слитки или сортовой прокат различного сечения (круглого, квадратного или прямоугольного). Поскольку размеры поперечного сечения проката ограничены, то для получения поковок большой массы в качестве заготовок используют слитки массой от 200 кг до 350 т.

Поковки могут быть сгруппированы по определяющим технологиям их изготовления признакам (масса поковки, ее конфигурация, группа сложности, марка сплава, тип производства и др.).

По конфигурации поковки разделяют на две группы: осесимметричные и неосесимметричные (табл. 2.3). Осесимметричные поковки, в свою очередь, разделяют на поковки типа дисков, колес, втулок, колец, размер которых вдоль оси меньше поперечного, и стаканов, втулок, валов и осей, размер которых вдоль оси больше поперечного. Неосесимметричные поковки разделяются на поковки типа рычагов, вилок и крюков. К многочисленной группе неосесимметричных поковок относятся поковки гаечных ключей, шатунов, звеньев гусениц тракторов, лопаток турбин, крюков грузоподъемных механизмов, коленчатых валов и др.

Классификация поковок

Осесимметричные поковки			
Типа дисков и колес	Типа втулок и колец	Типа стаканов и втулок	Типа валов и осей
			
Неосесимметричные поковки			
Типа рычагов, вилок, крюков			
			

Кроме этого при технологических расчетах по конфигурации поковки делят на группы сложности. Критерием сложности поковки считают отношение объемов поковки и описанной вокруг нее простой геометрической фигуры (призмы или цилиндра). Чем меньше это отношение, тем более сложной считается поковка.

### 3.2. Ковка металлов

**Ковка** — вид горячей ОМД, когда металл деформируется путем многократного воздействия на отдельные участки заготовки универсальным инструментом. При этом металл свободно течет в стороны, не ограниченные рабочими поверхностями инструмента.

Ковка является единственно возможным способом изготовления тяжелых поковок, масса которых составляет до 250 т и более (валов турбогенераторов, турбинных дисков, коленчатых валов судовых двигателей, якорей, валков прокатных станков, цельнотянутых барабанов для судов и котлов высокого давления) (рис. 2.35).



Рис. 2.35. Крупногабаритные поковки: *а* — валы ротора турбогенератора и паровой турбины (масса 360 т); *б* — коленчатый вал двухтактного судового двигателя (масса 150 т)

**Операции ковки.** Процесс ковки состоит из чередования в определенной последовательности операций, которые подразделяются на разделительные и формообразующие (ГОСТ 18970-74).

*Разделительные операции* — операции обработки металлов давлением, в результате которых происходит полное или частичное отделение одной части заготовки от другой. К этой группе операций относятся пробивка, надрубка, отрубка, разрубка и ломка (табл. 2.4).

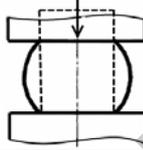
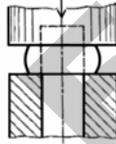
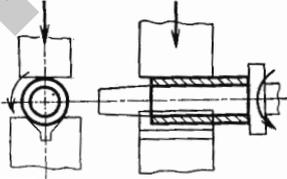
Таблица 2.4

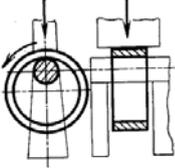
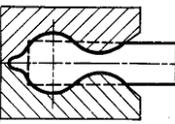
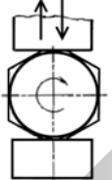
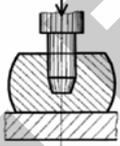
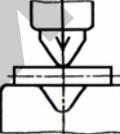
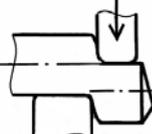
Разделительные операции ковки

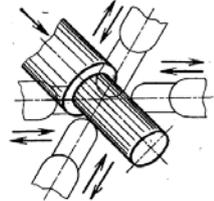
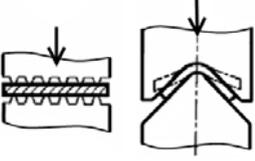
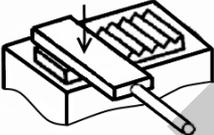
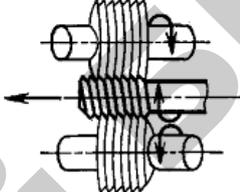
Определение операции	Схема операции
<b>Пробивка</b> — образование в заготовке отверстия или паза путем сдвига части металла с его удалением в отход	
<b>Надрубка</b> — образование углублений на заготовке за счет внедрения в нее кузнечного инструмента на неполную толщину заготовки	
<b>Отрубка</b> — полное отделение части заготовки по незамкнутому контуру путем внедрения в нее деформирующего инструмента	
<b>Разрубка</b> — разделение поковки или заготовки на части путем внедрения в нее кузнечного инструмента	
<b>Ломка</b> — разделение заготовки на части путем ее разрушения изгибом	

*Формоизменяющие операции* — операции обработки металлов давлением, в результате которых путем пластического деформирования заготовки изменяется ее форма. К этой группе операций относятся гибка, скручивание, правка давлением, прошивка, протяжка кузнечная, осадка давлением, высадка, раскатка, подкатка, обкатка, разгонка, радиальное обжатие, проглаживание, передача и накатка. Определения и схемы формоизменяющих операцийковки представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Формоизменяющие операцииковки	
Определение операции	Схема операции
1	2
<b>Осадка давлением</b> — уменьшение высоты заготовки при увеличении ее поперечного сечения	
<b>Высадка</b> — осадка на отдельном участке заготовки	
<b>Протяжка кузнечная</b> — удлинение заготовки или ее части за счет уменьшения площади поперечного сечения	
<b>Протяжка с оправкой</b> — увеличение длины пустотелой заготовки за счет уменьшения толщины ее стенок	
<b>Разгонка</b> — увеличение размеров заготовки или ее части (в плане) за счет уменьшения толщины	

1	2
<p><b>Раскатка</b> — увеличение диаметра кольцевой заготовки за счет уменьшения толщины стенок путем последовательного воздействия инструмента</p>	 <p>The diagram shows two stages of ring rolling. On the left, a cylindrical ring is being rolled between two horizontal rollers. On the right, the ring is shown after rolling, with a larger diameter and thinner walls.</p>
<p><b>Подкатка</b> — увеличение площади поперечных сечений заготовки на одних ее участках за счет уменьшения площади поперечного сечения исходной заготовки на других участках при ее незначительном удлинении</p>	 <p>The diagram shows a cross-section of a workpiece being upset. The central part is wider and shorter, while the ends are narrower and longer, illustrating the redistribution of material.</p>
<p><b>Обкатка</b> — придание заготовке цилиндрической формы путем деформирования, чередующегося с поворотами заготовки вокруг своей оси</p>	 <p>The diagram shows a cylindrical workpiece being ground between two grinding wheels. Arrows indicate the rotation of the workpiece and the grinding wheels.</p>
<p><b>Прошивка</b> — получение несквозной полости в заготовке за счет свободного вытеснения металла</p>	 <p>The diagram shows a hot-chamber die casting process. Molten metal is being poured into a mold cavity, displacing the metal already in the cavity.</p>
<p><b>Гибка</b> — образование или изменение углов между частями заготовки или придание ей криволинейной формы</p>	 <p>The diagram shows a workpiece being bent around a die. The top part is being pushed down, creating a curve in the material.</p>
<p><b>Передача</b> — смещение одной части заготовки относительно другой при сохранении параллельности их осей</p>	 <p>The diagram shows a workpiece being upset with displacement. The top part is being pushed down and shifted relative to the bottom part, while maintaining parallel axes.</p>
<p><b>Скручивание</b> — поворот части заготовки вокруг продольной оси</p>	 <p>The diagram shows a workpiece being twisted around its longitudinal axis. The top part is being rotated relative to the bottom part.</p>

1	2
<p><b>Радиальное обжатие</b> — уменьшение площади поперечного сечения заготовки под действием перемещающегося в радиальном направлении инструмента при их относительном вращении</p>	
<p><b>Правка давлением</b> — устранение искажений формы заготовки</p>	
<p><b>Проглаживание</b> — устранение неровностей поверхности заготовки последовательным местным ее деформированием</p>	
<p><b>Накатка</b> — образование на заготовке резьбы или мелких рифлений непрерывным воздействием инструмента</p>	

Изменение микроструктуры и механических свойств слитка при ковке зависит от степени деформации, которая выражается величиной **коэффициента уковки**.

Например, при осадке (увеличение площади поперечного сечения) коэффициент уковки  $У_k$  рассчитывается по формуле

$$У_k = F_k / F_n ,$$

а при протяжке (уменьшение площади поперечного сечения) —

$$У_k = F_n / F_k ,$$

где  $F_n$  — начальная площадь поперечного сечения;  $F_k$  — конечная площадь поперечного сечения.

Значение коэффициента уковки выбирают в зависимости от формы и назначения поковки. Так, для придания волокнистой структуры средней части слитка углеродистой стали достаточно производить протяжку или осадку с  $U_k$ , равным 2,5...3. Для поковок из стали карбидного класса, при ковке которых требуется измельчение карбидов и их равномерное распределение по сечению, необходимо принимать  $U_k$ , равным 8...12. При ковке из проката достаточно, чтобы  $U_k$  равнялся 1,3...1,5.

Следует отметить, что чем больше уковка, тем лучше прокован металл и выше его механические свойства. Лучшие механические свойства поковки по сравнению с отливкой обусловлены формированием мелкозернистой структуры слитка и разрушением его дендритной структуры, заваркой газовых пузырей и микротрещин, устранением ликвации и т. п. В таблице 2.6 приведены механические свойства заготовок из высоколегированной стали 110Г13Л.

Таблица 2.6

Сравнительная характеристика механических свойств отливки и поковки из стали 110Г13Л

Вид заготовки	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Ударная вязкость КС, МДж/м <sup>2</sup>
Отливка	340...600	15...26	1...2
Поковка	800...900	42...45	2,6...3

В этой связи протяжку применяют для получения поковок с удлиненной осью (валы, рычаги, тяги и т. п.) и для большей уковки металла заготовки (в чередовании с осадкой). Из таких заготовок изготавливаются при помощи механической обработки ответственные детали (шестерни, муфты и т. п.).

Ковку подразделяют на ручную и машинную. *Ручная ковка* применяется, главным образом, при ремонтных и сборочных работах, а также при изготовлении мелких поковок малыми партиями, и осуществляется при помощи специального кузнечного инструмента. *Машинная ковка* предназначена для получения мелких и средних поковок массой до 750 кг, а также крупных (массой до 350 т). Для ее осуществления необходимо наличие специализированного кузнечно-прессового оборудования (молоты, прессы) и кузнечного инструмента.

**Инструменты и оборудование дляковки.** По назначению кузнечный инструмент делят на три группы: основной технологический, вспомогательный (поддерживающий) и контрольно-измерительный.

**Основной технологический инструмент** служит для деформирования металла и придания ему требуемых форм и размеров. Основной инструмент подразделяют на опорный, ударный (рис. 2.36) и подкладной.

**Опорный** инструмент представляет собой массивную опору, на которой выполняют практически все кузнечные операции. Опорным инструментом для ручнойковки служат наковальни различных видов (рис. 2.36, а).

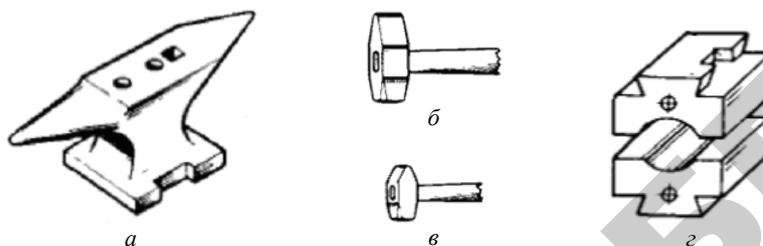


Рис. 2.36. Опорный и ударный кузнечный инструмент: а — наковальня; б — кувалда; в — ручник; г — бойки

К ударному инструменту при ручнойковке относятся кувалды (боевые молоты) (рис. 2.36, б) и ручники (кузнечные молотки) (рис. 2.36, в). С помощью кувалд выполняют основную работу деформации металла, ручники применяют для нанесения слабых ударов и управления мощными ударами молотобойца.

При машиннойковке роль опорного и ударного инструмента выполняют бойки (рис. 2.36, г), жестко закрепляемые на молотах и прессах. Бойки подразделяются на плоские, вырезные и универсальные. Плоские бойки применяют дляковки поковок прямоугольного (в том числе квадратного) сечения, выполнения большинства основных операцийковки, а также для правки, сглаживания поверхностей и т. д. Вырезные бойки, применяющиеся дляковки круглых поковок типа осей и валов, имеют ограниченное применение и относятся к специализированному ин-

струменту. Более широкое применение получили универсальные комбинированные бойки (плоский верхний и вырезной нижний). Их (как и вырезные бойки) применяют при ковке поковок круглого сечения, но эти бойки более универсальны, поскольку одна пара комбинированных бойков позволяет изготавливать круглые поковки более широкого диапазона по диаметру.

*Подкладной* инструмент (рис. 2.37) размещают на заготовке или под ней. К подкладному инструменту относятся:

1) кузнечные зубила и подсечки (при ручной ковке), кузнечные топоры различных типов и обсечки (при машинной ковке), предназначенные для выполнения разделительных операций;

2) подбойки (при ручной ковке) и раскатки, применяемые для интенсификации операций протяжки и осадки;

3) гладилки, предназначенные для сглаживания неровностей, образовавшихся на поверхности поковки от ударов кувалдой;

4) пережимки, применяемые для образования пережимов при ковке уступов, выемок и выступов на валах, а также для предварительной разметки заготовок и повышения точности обработки;

5) обжимки, предназначенные для сглаживания поверхности круглых, квадратных и фасонных поковок и повышения точности их размеров и форм;

6) гвоздильни, применяемые для высадки утолщенных головок у поковок типа стержней (болты, заклепки и др.);

7) подкладные штампы (при машинной ковке), используемые для изготовления небольших партий одинаковых поковок;

8) формы (при ручной ковке), применяемые для пробивки в поковках отверстий, при протяжке заготовок и отделке поковок круглого, квадратного, шестигранного и других сечений;

9) оправочные кольца, используемые для операций высадки, протяжки на оправке и раскатки;

10) пробойники (при ручной ковке) и прошивни (при машинной ковке), применяемые для изготовления в поковках отверстий и углублений.

**Вспомогательным** является **инструмент**, с помощью которого заготовку фиксируют в нужном положении в процессековки, кантуют вокруг оси, укладывают в печь, извлекают из нее и транспортируют к наковальне или к кузнечно-прессовому оборудованию.

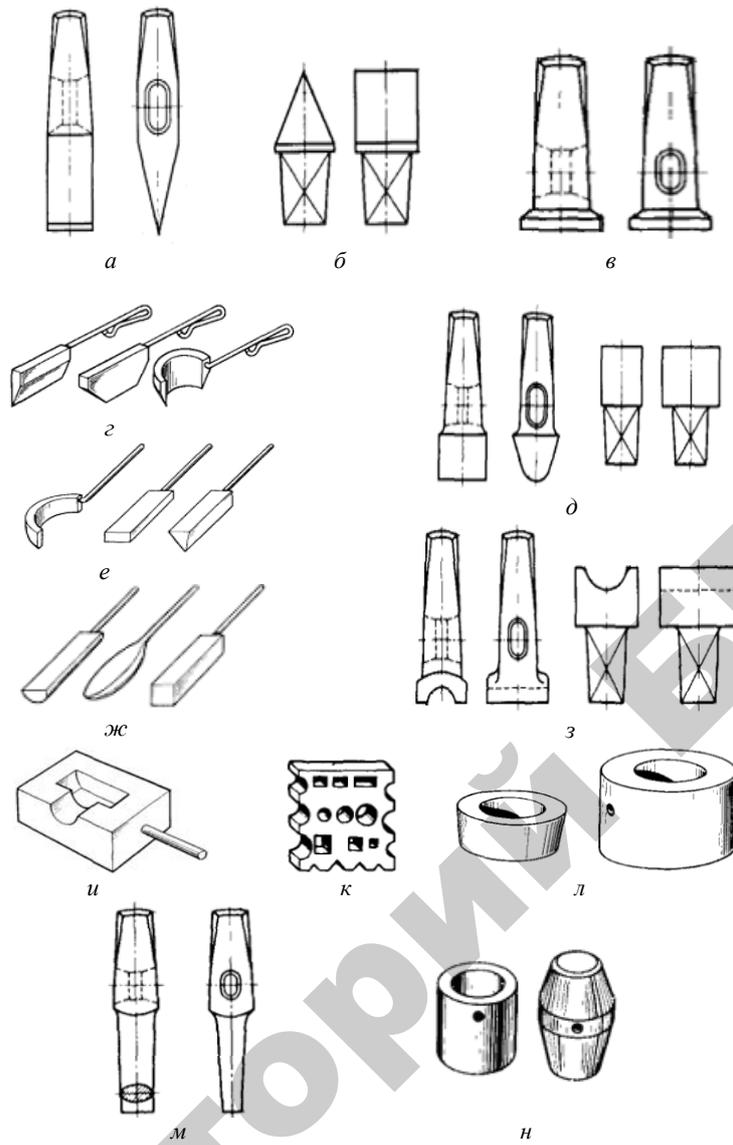


Рис. 2.37. Подкладной кузнечный инструмент: *а* — зубило; *б* — подсечка; *в* — гладилка; *г* — топоры; *д* — подбойки; *е* — обсечки; *ж* — раскатки; *з* — обжимки; *и* — подкладной штамп; *к* — форма; *л* — оправочные кольца; *м* — пробойники; *н* — прошивни

К вспомогательному кузнечному инструменту относится поддерживающий инструмент — клещи различных типов.

На крупных молотах и прессах обрабатывают заготовки такой массы, что для их перемещения в процессековки необходимо пользоваться различными механизированными захватными приспособлениями, специальными патронами, кантователями, ковочными манипуляторами, кран-балками и др.

**Контрольно-измерительный инструмент** применяют для разметки заготовки, контроля формы и размеров поковки по переходам в процессековки и окончательного контроля ее геометрических размеров. К контрольно-измерительному инструменту относятся универсальные (штангенциркуль, микрометр, кронциркуль, нутромер и др.), а также специальные инструменты, используемые непосредственно при выполнении операцийковки (металлические усадочные линейки, кузнечные кронциркули, нутромеры и шаблоны, предельные калибры (скобы) и угольники).

Основным **оборудованием** кузнечных цехов и участков для машиннойковки являются молоты и гидравлические прессы различных типов.

**Ковочные молоты** — машины динамического действия, деформирующие заготовку ударом (за счет кинетической энергии поступательно движущихся рабочих частей). В зависимости от типа привода молоты бывают пневматическими, паровоздушными, механическими, гидравлическими, газовыми и т. п.

По принципу действия молоты бывают простого действия и двойного действия. У молотов простого действия ударные части движутся вниз под действием силы тяжести, а привод служит только для их подъема. Привод молотов двойного действия служит для подъема ударных частей и их движения вниз. В этом случае им придается дополнительное ускорение давлением пара или воздуха (0,7...0,9 МПа).

**Гидравлические ковочные прессы** — машины статического действия, продолжительность деформации на них может длиться от единиц до десятков секунд. Металл деформируется приложением усилия, создаваемого с помощью жидкости (водной эмульсии или минерального масла), подаваемой в рабочий цилиндр прессы. Ковочные прессы развивают усилие 5...100 МН. Их используют для изготовления крупных поковок, в основном, из слитков.

**Технологический процессковки** состоит из следующих операций:

- 1) подготовка исходного металла;
- 2) нагрев металла перед ковкой;
- 3) ковка металла на молоте или прессе;
- 4) отделка поковки.

Основными документами для изготовления поковки являются чертеж поковки и технологическая карта.

Чертеж поковки составляют по чертежу готовой детали с учетом припуска на дальнейшую механическую обработку, допуска на номинальные размеры поковки (на точность изготовления поковки) и напуска (избытка металла) для упрощения очертаний поковки. Далее, исходя из чертежа поковки и с учетом величины коэффициента уковки, выбирают слиток или определяют размеры заготовки из проката. Форма и сложность поковки определяют выбор операцийковки и их последовательность. Затем выбирают инструмент, приспособления и оборудование для осуществления операцийковки. При разработке технологического процесса выбирают оборудование для нагрева заготовок, температурный интервал их нагрева и время выдержки заготовок в печи. Порядок выполнения кузнечных операций, используемый инструмент и оборудование указываются в технологической карте.

По сравнению с другими видами обработкиковка имеет следующие *преимущества*:

- 1) позволяет изготавливать крупногабаритные поковки массой в несколько сотен тонн, получение которых другими способами ОМД невозможно;
- 2) обеспечивает получение заготовок с улучшенными механическими свойствами;
- 3) обеспечивает возможность использования оборудования сравнительно небольшой мощности при ковке крупных поковок (по массе и размерам);
- 4) снижает себестоимость изделий за счет применения универсальных оборудования и инструмента.

Основными *недостатками*ковки являются следующие:

- 1) высокая трудоемкость и низкая производительность процесса;
- 2) установление больших припусков, напусков и допусков, что приводит к значительным отходам металла при механической обработке поковок.

### 3.3. Горячая и холодная объемная штамповка металлов

**Горячая объемная штамповка (ГОШ)** — вид горячей ОМД, при котором формообразование поковки осуществляется пластическим деформированием заготовки в специальном инструменте (штампе).

Штамп состоит из двух разъемных частей с внутренними рабочими полостями. Рабочие полости штампа допускают течение деформируемого металла только в определенном направлении и до определенных пределов, в результате чего обеспечивается принудительное получение поковки заданных размеров и формы. Такие рабочие полости штампа называют *ручьями*. Течение металла в ручьях штампа ограничивается поверхностями полостей штампа. В процессе штамповки при смыкании двух разъемных частей образуется единая замкнутая полость, заполненная деформируемым металлом и соответствующая конфигурации поковки.

Исходным материалом для ГОШ служат сортовой прокат или прессованные прутки круглого или прямоугольного (в том числе квадратного) сечения, а также периодический прокат. Штамповке чаще всего подвергают углеродистые или низколегированные стали, а также цветные металлы и сплавы (иногда).

Большое разнообразие форм и размеров штампованных заготовок и материалов, из которых штампуются эти заготовки, обуславливает различные способы их получения (в зависимости от типа штампов, способа установки в штампе, вида применяемого оборудования).

В зависимости от типа штампа ГОШ подразделяют на штамповку в открытых и закрытых штампах, а также в штампах для выдавливания.

**Штамповка в открытых штампах** характеризуется тем, что полость штампа в процессе деформирования незамкнута (рис. 2.38, *а*). В течение всего процесса деформирования между верхней и нижней частями штампа существует зазор, который постепенно уменьшается. В него выдавливается металл, образующий по периметру поковки *заусенец* (облой).

Процесс деформирования исходной заготовки в открытом штампе осуществляется следующим образом. В начальный мо-

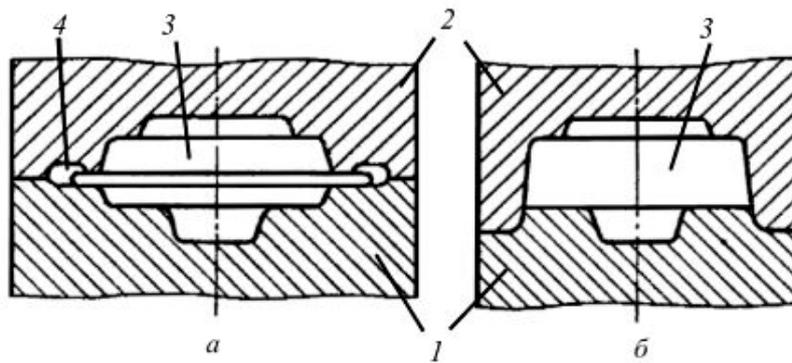


Рис. 2.38. Штамповка: *а* — в открытом штампе; *б* — в закрытом штампе;  
 1 — нижняя часть штампа; 2 — верхняя часть штампа; 3 — полость штампа;  
 4 — заусенечная (облойная) канавка

мент приложения усилия, когда зазор между частями штампа сравнительно большой, металл легко вытекает в заусенец, поскольку сопротивление течению здесь меньше, чем в трудно заполняемых углах полости штампа. При дальнейшем деформировании в результате сжатия заусенца, уменьшения его высоты и более интенсивного охлаждения, сопротивление течению металла в заусенечную канавку резко возрастает и полость штампа все больше «запирается». При возрастании усилия металл практически уже не течет в заусенец, а заполняет все углы штампа. В последний момент штамповки происходит так называемая доштамповка (вытеснение избытка металла в заусенечную канавку) и обе половины штампа практически смыкаются. Для создания заусенца (облоя) массу заготовки увеличивают на 10...20 % от массы поковки.

Поскольку весь излишек металла выдавливается в заусенец, точность размеров и формы поковок, получаемых в открытых штампах, не зависит от точности исходных заготовок (по массе). Все поковки являются точными отпечатками полости штампа, а объем заусенца имеет переменную величину.

В настоящее время штамповка в открытых штампах производится на различном оборудовании (молотах, механических прессах, гидравлических прессах и т. д.). Этот способ применяют для получения практически всех типов поковок.

**Штамповка в закрытых штампах.** Характерной особенностью штамповки в закрытых штампах является то, что деформация заготовки осуществляется в закрытой полости штампа (рис. 2.38, б). В этом случае весь объем металла, находящийся в полости штампа, идет на формообразование поковки и ее формирование происходит без вытекания металла в заусенец. Закрытые штампы имеют разъем по сложной поверхности с направляющими, обеспечивающими точное соударение половин штампа.

Зазор между подвижной (верхней) и неподвижной (нижней) частями закрытого штампа в процессе деформирования является постоянным и небольшим. Этот зазор служит только для обеспечения подвижности одной части штампа относительно другой и предохраняет штампы от заклинивания.

При безоблойной штамповке расход металла уменьшается на 20 % и исключаются затраты на обрезку облоя.

При штамповке в закрытых штампах благоприятная схема неравномерного всестороннего сжатия возникает в самом начале процесса, что способствует проявлению пластических свойств металла. Это позволяет штамповать малопластичные труднодеформируемые сплавы.

Объемная штамповка в закрытых штампах является прогрессивным технологическим способом штамповки и имеет ряд *преимуществ* перед штамповкой в открытых штампах. Из-за отсутствия заусениц экономится металл, ликвидируется потребность в прессах и штампах для его обрезки, снижается трудоемкость и сокращается технологический цикл изготовления поковок. В настоящее время в автомобиле- и тракторостроении, отличающихся наиболее отработанными технологиями штамповки, коэффициент использования металла составляет 0,75...0,8. Следует отметить, что за счет рационального распределения волокон металла, плавно обтекающих контур поковки, а также более равномерной деформации металла в закрытых штампах получают поковки более высокого качества, чем в открытых.

Однако закрытые штампы для деталей сложной формы конструктивно трудновыполнимы, дороги и быстро выходят из строя. Кроме того, при безоблойной штамповке необходимо точное соблюдение размеров заготовки и требуется ее установка по центру ручья штампа (иначе возможен брак — односторонние торцевые

заусенцы и неполное заполнение ручьев штампа металлом). При недостаточном объеме заготовки поковка будет иметь неформенные углы, а при завышенном объеме — толщина поковки будет превышать размер, заданный чертежом.

Закрытые штампы служат меньше, чем открытые, поскольку в закрытых штампах развиваются более высокие давления. Закрытые штампы часто выходят из строя из-за поломок, а не из-за стирания или смятия, как открытые штампы.

Покówki простой конфигурации, не имеющие больших отличий поперечных сечений по длине (высоте), обычно штампуют из мерных прокатанных заготовок в штампах с одной полостью, т. е. в одноручьевых штампах.

Покówki сложной конфигурации, требующие большого перераспределения металла, штамповать из заготовок постоянного профиля невозможно или нецелесообразно из-за больших отходов в заусенец. Такие заготовки изготавливают в **мноручьевых штампах** с последовательным деформированием заготовки в нескольких ручьях с постоянным приближением ее к окончательной форме поковки. При этом, чем сложнее поковка, тем больше требуется ручьев. Каждый ручей выполняет определенную функцию (рис. 2.39).

Ручьи в мноручьевых штампах подразделяются на заготовительные и штамповочные. *Заготовительные* ручьи предназначены для получения фасонной заготовки. В них металл перераспределяется для подготовки к окончательной штамповке. При штамповке из прутка в заготовительных ручьях производят следующие операции: осадку, протяжку, подкатку, разгонку и отрубку.

*Штамповочные* ручьи бывают черновые и чистовые. Черновой ручей не имеет облойной канавки и предназначен для предохранения чистового ручья от изнашивания. Форма чернового ручья такая же, как и у чистового, но радиусы закруглений и штамповочные уклоны несколько больше.

Чистовой ручей является точным отображением поковки, но с размерами большими на величину усадки при остывании (до 15 %).

Следует отметить, что выбор функции каждого из ручьев и их количества при разработке технологии штамповки влияет на экономичность и производительность процесса.

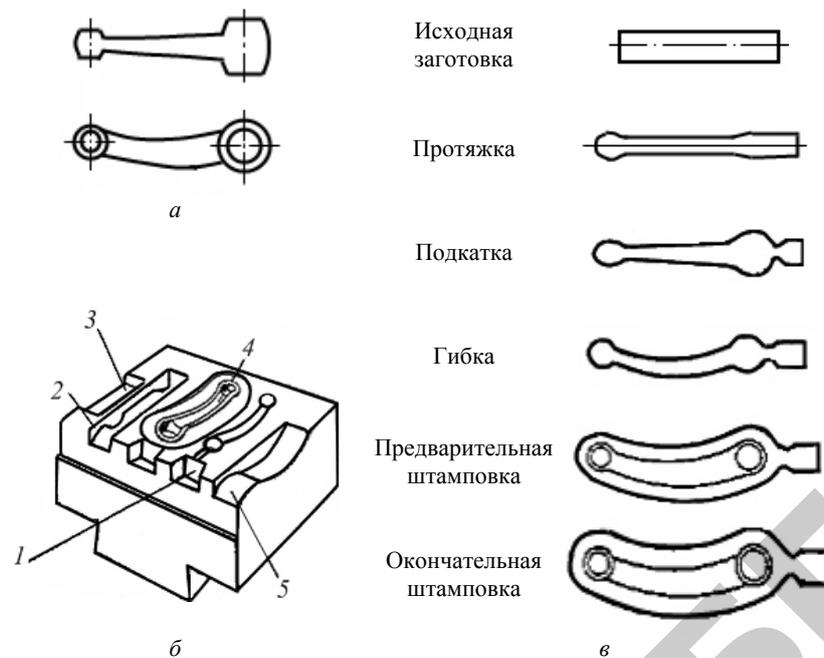


Рис. 2.39. Штамповка в многоручьевом штампе: *a* — эскиз поковки; *б* — схема многоручьевого штампа; *в* — операции штамповки с эскизами переходов: 1 — предварительный ручей; 2 — подкатной ручей; 3 — протяжной ручей; 4 — окончательный ручей; 5 — гибочный ручей

Горячую объемную штамповку выполняют на штамповочных молотах, прессах, горизонтально-ковочных машинах и специализированных машинах узкого назначения.

**Штамповочные молоты** предназначены для штамповки поковок разнообразной формы преимущественно в многоручьевых открытых штампах. Основным типом штамповочного молота являются паровоздушные молоты с массой падающих частей 630...25 000 кг. По принципу действия эти молоты подобны паровоздушным ковочным молотам, но имеют конструктивные отличия, обусловленные повышенными требованиями к точности перемещения частей штампа. Применяют также молоты гидравлические, фрикционные с падающей доской и бесшаботные паровоздушные.

Штамповка заготовок на молоте происходит обычно за 3...5 ударов. При последнем ударе обе части штампа смыкаются по плоскости разъема. Средняя масса поковок при массе падающих частей 1 т составляет 0,5...2 кг, при 10 т — 40...100 кг.

**Штамповочные прессы** для горячей объемной штамповки подразделяются на винтовые, фрикционные, гидравлические и кривошипные. Штамповка на кривошипных горячештамповочных прессах является наиболее прогрессивным методом объемной штамповки. Такие прессы с усилием 6,3...100 МН применяют для получения из сортового и периодического проката поковок различной формы в открытых и закрытых штампах.

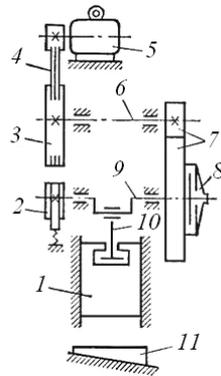


Рис. 2.40. Кинематическая схема кривошипного прессы: 1 — ползун; 2 — тормоз; 3 — маховик; 4 — клиноременная передача; 5 — электродвигатель; 6 — передаточный вал; 7 — зубчатая передача; 8 — муфта; 9 — кривошипный вал; 10 — шатун; 11 — плита для укрепления матрицы штампа

ных сталей и производить обработку с наименьшими отходами металла. В зависимости от направления течения металла различают штамповку *прямым выдавливанием*, *штамповку прошивкой (обратное выдавливание)* и *штамповку комбинированным выдавливанием* (рис. 2.41). При прямом выдавливании (рис. 2.41, а) течение металла 1 в штампе происходит в направлении движения пуансона 2. При обратном выдавливании (рис. 2.41, б) металл 1 течет в направлении,

*Кривошипные прессы* (рис. 2.40) имеют постоянный ход, равный удвоенному радиусу кривошипа. Наличие постоянного хода кривошипа обеспечивает большую точность размеров поковок по высоте, а высокая жесткость конструкции прессы, отсутствие ударов и сотрясений позволяют применять направляющие колонки у штампов, что практически исключает сдвиг верхней и нижней частей штампа друг относительно друга. При этом имеется больше возможностей для механизации и автоматизации процесса, чем при штамповке на молотах.

**Штамповка в штампах для выдавливания** характеризуется тем, что позволяет изготавливать поковки из малопластичных высокопрочных

обратном движению пуансона 2. На практике также применяют комбинированное выдавливание, при котором металл 1 течет в прямом и обратном направлениях (рис. 2.41, в). Штампы для комбинированного выдавливания, как правило, предусматривают наличие выталкивателя, располагающегося в нижней части штампа.

Прямым выдавливанием изготавливают стержневые поковки, имеющие на одном конце утолщение (например, клапаны). Штамповкой прошивкой (обратное выдавливание) изготавливают поковки типа полых стаканов, гильз, различных втулок и т. п. Штамповка выдавливанием производится преимущественно на гидравлических прессах, кривошипных прессах и горизонтально-ковочных машинах.

Штамповка выдавливанием в штампах с разъемными матрицами (рис. 2.42) является дальнейшим развитием метода штамповки в закрытых штампах. Наличие дополнительного разъема позволяет получить за один переход поковки сложной формы (например, с выступами или отверстиями в боковых стенках, не выполнимыми при штамповке в цельной матрице). Применение разъемных матриц значительно увеличивает разнообразие форм поволок, допускающих их штамповку в закрытых штампах без упрощения формы поволок назначением напусков.

На рисунке 2.43 представлены переходы при изготовлении этим методом поворотного кулака автомобиля. При первом переходе заготовку осаживают, при втором — частично выдавливают хвостовик и начерно формируют головку, при третьем — металл выдавливают в прямом и обратном направлениях, а хвостовик и головка приобретают окончательные размеры и форму.

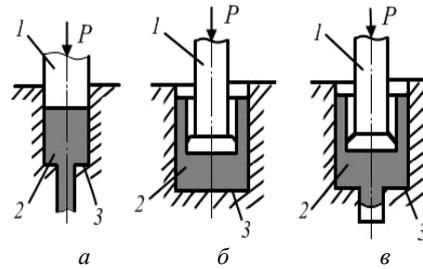


Рис. 2.41. Штамповка в штампах для выдавливания: а — прямое выдавливание; б — обратное выдавливание; в — комбинированное выдавливание; 1 — пуансон; 2 — металл; 3 — матрица

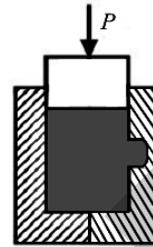


Рис. 2.42. Штамповка выдавливанием в разъемных матрицах

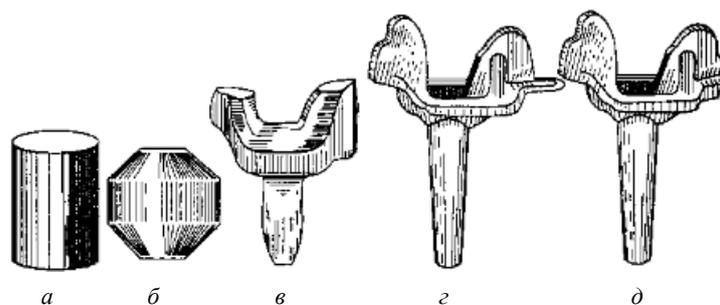


Рис. 2.43. Изготовление поковки поворотного кулака комбинированным выдавливанием: *a* — заготовка; *б* — осадка; *в* — штамповка головки в предварительном ручье; *г* — окончательная штамповка; *д* — отрезка обля (осуществляется на обрезном прессе)

Наиболее распространенным видом штамповки выдавливанием в разъемных матрицах является штамповка на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ), механизм которых обеспечивает рабочее движение пуансона и разъем матрицы.

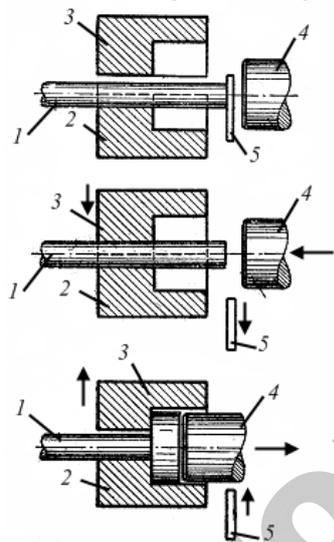


Рис. 2.44. Схема штамповки на горизонтально-ковочных машинах: *1* — заготовка; *2* — неподвижная часть матрицы; *3* — подвижная часть матрицы; *4* — пуансон; *5* — упор

При штамповке на ГКМ в качестве заготовок используют круглый прокат либо трубы. Основная продукция, получаемая с помощью ГКМ, — это стержни с утолщением на концах типа клапанов, втулок, колец и т. п. Штамп состоит из трех частей (рис. 2.44): неподвижной части матрицы *2*, подвижной части *3* и пуансона *4*. Штампуемый пруток *1* подается до упора *5* и зажимается матрицами, имеющими полости, при смыкании образующие калибр, конфигурация которого соответствует форме получаемой поковки. При движении пуансона металл в матрице деформируется и заполняет ее полость. Благодаря разьему матрицы припуски и уклоны штамповки минимальны или отсутствуют. При обратном ходе

машины пуансон и подвижная матрица возвращаются в исходное положение, и поковка извлекается из ручья.

Общий **технологический процесс ГОШ** состоит из отрезки заготовок, их нагрева, штамповки (за несколько переходов или даже операций), отрубки облоя и зачистки заусенцев, термической обработки и отделки поверхности. Операции, которые производят с поковкой после ее штамповки, называют *отделочными*. К ним относятся: обрезка заусенца, правка штампованных поковок, термическая обработка, очистка поковок от окалины и калибровка поковок.

Горячую объемную штамповку широко применяют в массовом и крупносерийном производстве для изготовления поковок различных форм и размеров из сталей, цветных металлов и сплавов (рис. 2.45).



Рис. 2.45. Детали автотракторной техники, полученные горячей объемной штамповкой: *a* — вал коленчатый кривошипно-шатунного механизма двигателя трактора Т-150К; *б* — шатун и крышка шатуна кривошипно-шатунного механизма двигателя автомобиля ГАЗ; *в* — крестовина заднего моста автомобиля КАМАЗ; *г* — кулак поворотный рулевого управления автомобиля КАМАЗ; *д* — полуось заднего моста автомобиля КАМАЗ; *е* — опора шаровая переднего моста автомобиля КАМАЗ (цифры на рисунке — номера деталей по каталогу)

Основными *преимуществами* ГОШ являются следующие:

- 1) высокая производительность (до сотен поковок в час);
- 2) меньшие припуски и допуски, чем при ковке. Это упрощает механическую обработку и снижает трудоемкость.

Вместе с тем следует отметить, что для ГОШ требуются значительно большие усилия, чем при ковке одностипных деталей. Это связано с тем, что при штамповке течение металла затруднено трением о стенки ручья и тем, что деформации одновременно подвергаются большие объемы заготовки.

Кроме того, масса штампованных поковок ограничивается мощностью оборудования (обычно до 100...200 кг).

**Холодная объемная штамповка (ХОШ)** — вид холодной ОМД, при котором формообразование поковки осуществляется пластическим деформированием заготовки в штампе.

Эта штамповка является высокоэффективным экономичным способом изготовления деталей (чаще всего в виде тел вращения) в промышленности (машиностроительной, приборостроительной, электротехнической и др.). Полученные детали, как правило, не требуют дальнейшей механической обработки и имеют высокие прочностные свойства.

В процессе ХОШ непрерывно изменяются форма и структура металла, а также его физико-механические свойства. Возникающий при этом наклеп металла в некоторых случаях ограничивает возможности формообразования, поэтому процессы холодной штамповки часто выполняют за несколько технологических переходов (с промежуточным отжигом для восстановления пластических свойств металла) с постепенным приближением к окончательной форме и размерам готовых деталей.

Возможность осуществления процессов ХОШ и получение качественных готовых изделий во многом определяются качеством исходного материала. Поэтому следует осуществлять предварительную подготовку поверхности заготовок (удаление окалины, загрязнений и поверхностных дефектов). Заготовки предварительно смазывают, что способствует снижению усилий штамповки, повышению стойкости инструмента, улучшению качества поверхности деталей и предотвращению образования в них трещин и других дефектов.

Холодную объемную штамповку выполняют на прессах или специальных холодноштамповочных автоматах. Ее основными разновидностями являются холодное выдавливание, холодная высадка и холодная объемная формовка.

Как и при горячей объемной штамповке *холодное выдавливание* может быть прямое, обратное и комбинированное (рис. 2.41).

Заготовками для выдавливания служат горячекатаные прутки. Иногда используют заготовки, предварительно вырубленные из листа. В этом случае для предотвращения разрывов кромок при выдавливании края заготовки предварительно отжигают для снятия наклепа, образовавшегося при вырубке.

Выдавливанием получают детали преимущественно цилиндрической или близкой к ней формы (например, корпуса автомобильных свечей зажигания, конденсаторных батарей, генераторов и т. п.). Точность размеров и шероховатость поверхностей деталей соответствуют этим параметрам, получаемым при обработке резанием.

При выдавливании металл деформируется в условиях неравномерного всестороннего сжатия и поэтому обладает повышенной пластичностью. Тепловой эффект при больших скоростях деформаций может повысить пластичность металла и снизить его сопротивление деформированию.

Для выдавливания требуются большие удельные усилия, поскольку в холодном состоянии металл обладает высоким сопротивлением деформированию (для алюминиевых сплавов оно составляет 500...1 200 МПа, для сталей — 2 000...3 000 МПа). Стойкость пуансонов и матриц для выдавливания обеспечивается применением для каждого типа металла оптимальных покрытий поверхности заготовок и смазок.

**Холодная высадка** — это осадка части заготовки, т. е. образование местных утолщений требуемой формы (например, головки болтов, винтов и заклепок). Заготовкой обычно служит холоднотянутый материал (черный или цветной металл) в виде проволоки или прутка диаметром 0,5...50 мм. Высадкой изготовляют стандартные и специальные крепежные детали, а также колеса, детали массового производства (например, кулачки и зубчатые колеса заднего вала и т. п.). При высадке за один удар отношение длины высаживаемой части заготовки к ее диаметру должно составлять не более 2,5...2,8. Высадку выполняют на холодновысадочных автоматах различных конструкций. Производительность автоматов достигает 400 деталей в минуту.

**Холодная формовка** — это формообразование деталей вследствие заполнения металлом полости штампа. Она производится в открытых штампах (с вытеканием излишка металла в специальную

полость с образованием заусенца) и в закрытых штампах (без образования заусенца). Конструкции штампов, применяемых для холодной формовки, подобны штампам, используемым при горячей объемной штамповке (рис. 2.38).

Холодной формовкой изготавливают пространственные детали сложных форм (сплошные и с отверстиями). Детали обычно получают за несколько проходов, последовательно изменяя форму заготовки, с промежуточным отжигом для снятия наклепа. При необходимости дальнейшей обработки резанием на заготовках предусматривают припуск для шлифования (до 0,4 мм) или для полирования (до 0,05 мм).

*Преимущества ХОШ следующие:*

1) коэффициент использования металла достигает 95 % (при обработке резанием — 30...40 %);

2) получают готовые детали или близкие по размерам к ним заготовки высокой точности и с малой шероховатостью поверхности, требующие минимальной обработки резанием;

3) малая трудоемкость и низкая себестоимость изготовления поковок (трудоемкость изготовления болтов на холодновысадочных автоматах в 200...400 раз меньше, чем на токарно-револьверных станках);

4) высокая производительность процесса (в 2...3 раза выше горячей объемной штамповки и в 10...15 раз выше обработки резанием);

5) формируется ориентированная волокнистая структура металла, которая придает деталям высокую усталостную прочность при динамических нагрузках.

Следует отметить, что с помощью ХОШ обрабатывают сплавы, обладающие в холодном состоянии необходимой пластичностью. Этим видом штамповки изготавливают детали из стали диаметром до 70...80 мм, а также из медных и алюминиевых сплавов диаметром до 150...200 мм при толщине стенок деталей от 0,1 до 15 мм и их длине до 1 500 мм. Масса деталей, штампуемых на автоматах, достигает 3,5 кг (на прессах — 40 кг), а диаметр поковок составляет до 200 мм.

Так, ХОШ получают детали симметричные и асимметричные, со шлицами, канавками, ступенчатыми полостями и других сложных форм из сталей многих марок и сплавов цветных металлов (рис. 2.46).



*a*



*б*

Рис. 2.46. Примеры деталей, полученных холодной объемной штамповкой: *a* — холодная высадка метизов; *б* — холодное выдавливание деталей сложной формы

### 3.4. Листовая штамповка металлов

**Листовая штамповка (ЛШ)** — штамповка изделий или заготовок из листового или фасонного проката без значительного перераспределения металла в поперечном сечении исходной заготовки.

В качестве исходных заготовок при ЛШ используют листовой материал, трубные заготовки, катаные и гнутые профили.

Листовую штамповку осуществляют как в холодном состоянии, так и в горячем. Горячей листовой штамповкой (ГЛШ) получают крупногабаритные детали паровых и гидравлических турбин большой мощности, а также детали прессов, прокатных станов, космических аппаратов, подводных лодок, судов и др.

Все операции листовой штамповки можно объединить в две группы: разделительные и формоизменяющие.

*Разделительные операции* — операции обработки давлением, в результате которых происходит полное или частичное отделение одной части заготовки от другой. К разделительным операциям ЛШ относятся: отрезка, разрезка, вырубка, надрезка, проколка, пробивка и обрезка (табл. 2.7).

Таблица 2.7

## Разделительные операции листовой штамповки

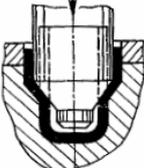
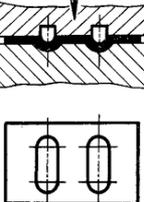
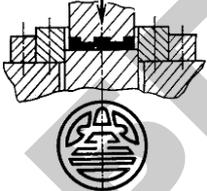
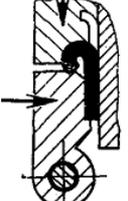
Определение операции	Схема операции
<b>Отрезка</b> — полное разделение заготовки по незамкнутому контуру путем сдвига	
<b>Разрезка</b> — разделение заготовки на части по незамкнутому контуру путем сдвига	
<b>Вырубка</b> — полное отделение заготовки или изделия от исходной заготовки по замкнутому контуру путем сдвига, при котором отделяемая часть является деталью	
<b>Надрезка</b> — неполное отделение части заготовки путем сдвига	
<b>Проколка</b> — образование в заготовке отверстия без удаления металла в отход	
<b>Пробивка</b> — образование в заготовке отверстия или паза путем сдвига с удалением части металла в отход, которым является отделяемая часть металла	
<b>Обрезка</b> — удаление излишка металла путем сдвига	

*Формообразующие операции* — операции обработки металлов давлением, в результате которых изменяется форма заготовки путем пластического деформирования. К формообразующим операциям ЛШ относятся гибка, вытяжка, отбортовка, обжим, раздача, рельефная формовка, чеканка, калибровка, закатка и завивка (табл. 2.8).

Таблица 2.8

Формообразующие операции листовой штамповки

Определение операции	Схема операции
1	2
<b>Гибка</b> — образование или изменение углов между частями заготовки или придание ей криволинейной формы	
<b>Вытяжка</b> — образование полой заготовки или изделия из плоской или полой исходной листовой заготовки	
<b>Вытяжка с утонением</b> — вытяжка полой заготовки с обусловленным уменьшением толщины стенок исходной полой заготовки без изменения ее внутреннего диаметра	
<b>Комбинированная вытяжка</b> — вытяжка плоской или полой заготовки с уменьшением толщины стенок или с изменением диаметра полой заготовки	
<b>Отбортовка</b> — образование борта по внутреннему или (и) наружному контуру заготовки	
<b>Обжим в штампе</b> — уменьшение размеров поперечного сечения части полой заготовки путем одновременного воздействия инструмента по всему ее периметру	

1	2
<p><b>Раздача</b> — увеличение размеров поперечного сечения части полой заготовки путем одновременного воздействия инструмента по всему периметру</p>	
<p><b>Рельефная формовка</b> — образование рельефа в листовой заготовке за счет местных растяжений без изменения толщины металла</p>	
<p><b>Чеканка</b> — образование на поверхности заготовки рельефных изображений за счет перераспределения металла</p>	
<p><b>Калибровка</b> — повышение точности размеров штампованной заготовки и уменьшение шероховатости ее поверхности</p>	
<p><b>Закатка</b> — образование закругленных бортов на краях полой заготовки</p>	
<p><b>Завивка</b> — образование закруглений на концах плоской заготовки или заготовки из проволоки</p>	

Основные формообразующие операции ЛШ характеризуются следующими особенностями и параметрами.

Мерой деформации при вытяжке является *коэффициент вытяжки*, который определяется по формуле

$$K_v = \frac{D_{\text{заг}}}{D_{\text{изд}}},$$

где  $D_{\text{заг}}$  — диаметр заготовки;  $D_{\text{изд}}$  — диаметр изделия.

Обычно  $K_v = 1,6 \dots 2,2$ . Предельный (теоретический) коэффициент вытяжки для деталей типа кругового цилиндра с дном равен 2,7. Если требуется получать детали с большими значениями  $K_v$ , то применяют многопроходную вытяжку с промежуточным отжигом. Размеры заготовок под вытяжку определяют из условия равенства площади поверхности заготовки и готового изделия.

При вытяжке с утонением стенки увеличение высоты изделия достигается не за счет уменьшения диаметра изделия, а за счет утонения самой стенки. Степень деформации стенки (утонение) может составлять 40...60 %.

Комбинированной вытяжкой получают осесимметричные детали, а также детали коробчатой и более сложных форм (например, кузовные детали автомобилей).

Формоизменение заготовки при отбортовке характеризуется *коэффициентом отбортовки*  $K_{\text{отб}}$ , который определяется по формуле

$$K_{\text{отб}} = \frac{D_{\text{заг}}}{D_{\text{изд}}},$$

где  $D_{\text{заг}}$  и  $D_{\text{изд}}$  — диаметры отверстия до и после отбортовки.

Коэффициент  $K_{\text{отб}}$  зависит от механических свойств заготовки и ее относительной толщины (отношение толщины к диаметру изделия) и не должен превышать 1,8.

За один переход при обжиге можно получить диаметр заготовки  $D_{\text{изд}} = (0,7 \dots 0,8)D_{\text{заг}}$ . Для получения изделия меньшего диаметра делают несколько последовательных операций, иногда с промежуточным отжигом.

Рельефную формовку часто используют для увеличения жесткости листов конструкции путем создания конструкционных выступов или впадин (ребер жесткости). Таким образом изготавливают некоторые детали в автомобилестроении (капот и крышка багажника автомобиля, двери, боковины канистр и т. п.).

Чеканка широко применяется при изготовлении монет, медалей, жетонов и т. п.

**Оборудование и инструмент для ЛШ.** Разделительные операции осуществляют, как правило, на механических ножницах гильотинного, аллигаторного и дискового типов или на штампах, установленных на различных видах прессов.

Формообразующие операции ЛШ осуществляют на механических прессах с увеличенным ходом, а также гидравлических прессах в штампах различных типов. Штампы состоят из блоков деталей и рабочих частей — матриц и пуансонов. Рабочие части непосредственно деформируют заготовку. Детали блока (верхняя и нижняя плиты, направляющие колонки и втулки) служат для опоры, направления и крепления рабочих частей штампа. По технологическому признаку различают штампы простого действия, последовательного и совмещенного.

**Специальные способы ЛШ.** В производстве (единичном и мелкосерийном) применять жесткие штампы экономически невыгодно. В этих случаях широко применяют различные способы штамповки: взрывом, электрогидравлическую (ЭГШ), магнитно-импульсную и др.

**Штамповка взрывом** (рис. 2.47) основана на деформации листовой заготовки 2 давлением ударной волны, образующейся при взрыве бризантных (тротил, гексоген и др.) взрывчатых веществ 1.

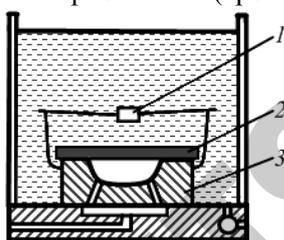


Рис. 2.47. Схема штамповки взрывом: 1 — заряд; 2 — заготовка; 3 — матрица

Штамповка взрывом применяется для изготовления крупногабаритных деталей при толщине листа более 2 мм.

В зависимости от размеров и формы штампуемых деталей штамповка взрывом осуществляется различными способами: в бассейнах с водой (при больших габаритах деталей) и в бронекерах (наземные установки) (при штамповке небольших деталей).

Штампы для штамповки взрывом состоят из матрицы 3, имеющей рабочую полость соответственной формы с отверстием для удаления воздуха. Для небольших деталей применяют металлические литые или сварные матрицы. Для изготовления крупногабаритных деталей, матрицы в целях удешевления выполняют из дерева или железобетона с поверхностной облицовкой рабочих поверхностей металлом или стеклопластиком.

Преимуществом данного способа штамповки является высокая экономическая эффективность в результате резкого снижения капитальных затрат и сокращения сроков и стоимости подготовки производства. Другим достоинством данного способа является возможность штамповки деталей из высокопрочной стали.

В основу **электрогидравлической штамповки** положен электрогидравлический эффект образования ударных волн при мощных электрических разрядах в жидкостях (рис. 2.48). Заготовку 3 укладывают на матрицу 4, имеющую полость, соответствующую конфигурации изготавливаемой детали, и сверху закрывают контейнером 5. В контейнере установлены электроизолированные электроды 2, подсоединенные к сети высоковольтных конденсаторов большой емкости. Полость матрицы вакуумируют, а в полость контейнера закачивают воду. При мгновенном разряде конденсаторной батареи (время разряда  $4 \cdot 10^{-5}$  с) в жидкости возникает ударная волна, деформирующая заготовку, которая принимает форму матрицы.

**Магнитно-импульсная штамповка** (рис. 2.49) характеризуется тем, что давление на деформируемую металлическую заготовку создается непосредственным воздействием импульсного магнитного поля (без участия промежуточных твер-

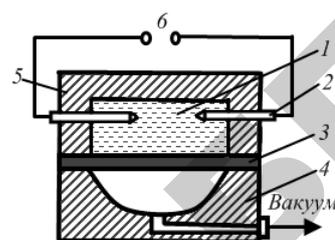


Рис. 2.48. Схема электрогидравлической штамповки: 1 — камера; 2 — электроды; 3 — заготовка; 4 — матрица; 5 — контейнер; 6 — источник тока

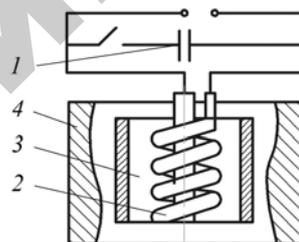


Рис. 2.49. Магнитно-импульсная штамповка: 1 — источник тока; 2 — индуктор; 3 — заготовка; 4 — матрица

дых, жидких или газообразных сред). Это позволяет штамповать детали из полированных и лакированных заготовок без повреждения поверхности, а также деформировать заготовки, заключенные в герметическую пластмассовую оболочку.

Магнитно-импульсная обработка основана на мгновенном разряде электроэнергии, накопленной в мощной конденсаторной батарее 1, через индуктор 2, являющийся рабочим органом. При этом в цепи индуктора протекает импульс тока, а в прилегающем пространстве возникает импульсное магнитное поле, которое индуцирует в металлической заготовке 3 вихревые токи противоположного направления.

При взаимодействии магнитного поля индуктора с индуцированным в заготовке током и его магнитным полем возникают электромеханические силы взаимодействия, стремящиеся оттолкнуть заготовку от индуктора и вызывающие ее деформацию.

Магнитный импульс длится от 10 до 20 мкс, создавая давление от 350 до 3 900 МПа. Следует отметить, что (как и при штамповке взрывом) длительность магнитного импульса во много раз меньше времени деформации заготовки. Поэтому импульсное поле непосредственно действует на заготовку лишь в начальный момент (период разгона), а дальнейшая деформация заготовки происходит под действием полученного ею запаса кинетической энергии.

Движущаяся с высокой скоростью заготовка (300...400 м/с) ударяется о матрицу 4, в результате чего возникают силы соударения, деформирующие заготовку. Импульсная магнитная штамповка получила сравнительно широкое применение в промышленности (для вытяжки, пробивки отверстий, обжатия и раздачи труб, сборки трубчатых деталей с оправками и т. п.).

Широкое применение ЛШ обусловлено *преимуществами*, которыми обладает данный способ. К ним можно отнести следующие:

- 1) высокое качество поверхности и точность штампуемых изделий, что позволяет исключить (или свести к минимуму) последующую обработку поверхности;
- 2) высокая производительность процесса и простота его механизации и автоматизации.

Листовой штамповкой можно получать изделия из самых различных металлов и сплавов, обладающих пластичностью в холодном состоянии. Наиболее распространена холодная листовая

штамповка углеродистых и легированных сталей, меди и ее сплавов, алюминия и его сплавов и т. д.

Листовая штамповка получила широкое применение во всех отраслях промышленности: общем машиностроении, приборостроении, авиа- и автопромышленности, а также при производстве различных товаров народного потребления. Этим способом изготавливают самые разнообразные плоские и пространственные детали массой от долей грамма до десятков килограммов (рамы и кузова автомобилей, шасси самолетов, элементы обшивки судов, детали часовых механизмов, кастрюли, ложки, детали кухонной плиты, корпус радиатора отопления, оконные откосы и отливы и др.) (рис. 2.50).

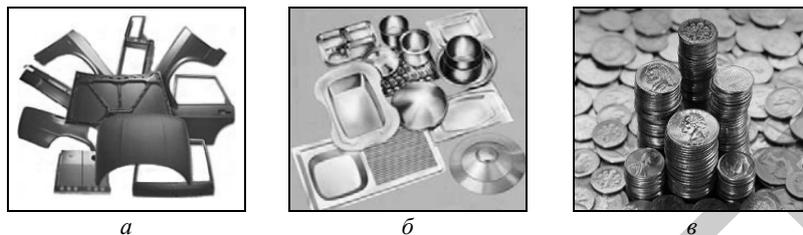


Рис. 2.50. Виды продукции, полученной листовой штамповкой: *а* — детали обшивки автомобиля; *б* — изделия народного потребления; *в* — монеты

### Вопросы для самоконтроля

1. Ковка металлов, разделительные и формообразующие операции.
2. Классификация инструмента, используемого дляковки.
3. Основное оборудование, используемое при машиннойковке.
4. Сущность горячей объемной штамповки.
5. Штамповка в штампах для выдавливания, в открытых и закрытых штампах.
6. Технологический процесс горячей объемной штамповки, преимущества и недостатки этого метода.
7. Холодная объемная штамповка, ее основные разновидности.
8. Листовая штамповка металлов, ее разделительные и формообразующие операции.
9. Оборудование и инструмент, используемые для листовой штамповки.
10. Специальные способы листовой штамповки.

## МАТЕРИАЛЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

### Лабораторная работа 1. ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Цель работы.** Изучить влияние пластической деформации на изменение структуры и механических свойств металлов и сплавов.

**Подготовка студента к занятию.** Изучить следующие вопросы теоретического материала:

1. Способы обработки металлов давлением.
2. Физические основы пластической деформации.
3. Явления наклепа и возврата, процесс рекристаллизации.

**Средства обучения. Оборудование и инструменты:** гидравлический ковочный пресс ПБ 452, набор ограничительных колец высотой 9,6; 7,2 и 4,8 мм соответственно, штангенциркуль, твердомер ТК-2, электрическая печь для рекристаллизационного отжига, металлографический микроскоп МИМ-7. **Материалы:** экспериментальные отожженные образцы из среднеуглеродистой стали цилиндрической формы ( $d = 8$  мм,  $h_0 = 12$  мм), набор из трех микрошлифов стали 45 (1 — отожженный и недеформированный; 2 — деформированный и неотожженный; 3 — деформированный и отожженный).

#### Порядок выполнения лабораторной работы

##### 1. Деформирование образцов.

Для проведения исследований в лабораторной работе студентам предоставляются четыре экспериментальных образца.

С помощью гидравлического ковочного пресса ПБ 452 три из четырех образцов поочередно подвергают деформации (осадке) с различной степенью  $\epsilon$ .

Схема деформации образцов приведена на рисунке 2.51. На нижний неподвижный боек 5 пресса устанавливается ограничительное кольцо 4 (высотой  $h_1$ ), с размещенным внутри его исходным образцом 2 высотой  $h_0$ . Верхний подвижный боек 1 приводится в движение и, двигаясь вниз, деформирует образец. Его движение вниз ограничено высотой  $h_1$  ограничительного кольца. Как только верхний боек достигнет поверхности ограничительного кольца, его движение

прерывается. При этом высота деформированного образца 3 будет равна высоте ограничительного кольца  $h_1$ , а степень деформации образца  $\varepsilon$  может быть рассчитана по формуле

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100 (\%)$$

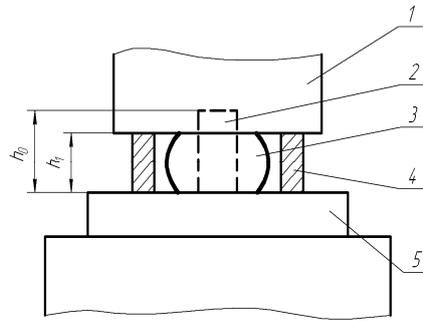


Рис. 2.51. Схема деформации образцов

После приведения верхнего бойка пресса в исходное состояние (подъема вверх) деформированный образец извлекается.

По приведенной выше формуле студенты рассчитывают степень деформации  $\varepsilon$  образцов.

## 2. Исследование свойств и структуры образцов после пластической деформации и рекристаллизационного отжига.

На твердомере ТК-2 измеряется твердость исходного (недеформированного) образца и трех деформированных с различной степенью остальных образцов. Твердость измеряется на торцевой поверхности образца в точке, расположенной на достаточно большом расстоянии от центра образца и не менее, чем 3...4 мм от его края. Количество измерений твердости на каждом образце должно быть не менее трех. За конечный результат берется среднее арифметическое всех замеров твердости на каждом образце.

Далее деформированные образцы подвергаются рекристаллизационному отжигу. После отжига их твердость вторично измеряется по методике, описанной выше.

На металлографическом микроскопе МИМ-7 при увеличении в 200...300 раз с использованием трех микрошлифов (1 — отожженный и недеформированный; 2 — деформированный и неотожженный; 3 — деформированный и отожженный), анализируются изменения микроструктуры стали 45, происходящие при пластической деформации и рекристаллизационном отжиге.

### Оформление результатов работы.

Приводится расчет степени деформации  $\varepsilon$  трех образцов.

Результаты измерений твердости недеформированного, трех деформированных и трех деформированных и отожженных образцов заносятся в протокол испытаний (табл. 2.9).

Таблица 2.9

Номер образца	Степень деформации образца $\epsilon$ , %	Твердость, HRC	
		после деформации	после отжига
1			
2			
3			
4			

На основании полученных экспериментальных данных студенты строят графические зависимости твердости (HRC) образцов от степени их деформации (кривая упрочнения).

Студенты зарисовывают и анализируют схемы микроструктур образцов: до деформации, после деформации, после деформации и рекристаллизационного отжига.

В отчете студенты делают выводы о влиянии степени деформации на механические свойства и изменения микроструктуры исследованных образцов.

#### **Вопросы для текущего контроля** (к защите лабораторной работы)

1. Дать определения понятиям: обработка металлов давлением, наклеп, возврат, рекристаллизация, холодная обработка металлов давлением, горячая обработка металлов давлением.
2. Проанализировать кривую упрочнения деформированных образцов, построенную по результатам эксперимента.
3. Охарактеризовать изменение микроструктуры образцов после деформации и после их деформации и рекристаллизационного отжига.
4. Описать влияние холодного деформирования на механические свойства и структуру металлов.
5. Охарактеризовать влияние рекристаллизационного отжига на механические свойства и структуру металлов.

## Лабораторная работа 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ДЕФОРМАЦИЮ МЕТАЛЛА, И УСЛОВИЙ ЗАХВАТА ЗАГОТОВКИ ВАЛКАМИ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКЕ

**Цель работы.** Экспериментально определить основные параметры, характеризующие деформацию металла при продольной прокатке, рассчитать возможность захвата заготовки валками.

**Подготовка студента к занятию.** Изучить следующие вопросы теоретического материала:

1. Основные виды прокатки.
2. Сущность продольной прокатки.
3. Основные параметры, характеризующие деформацию при продольной прокатке.
4. Условие захвата заготовки валками при продольной прокатке.

**Средства обучения.** *Оборудование и инструменты:* лабораторный прокатный стан, контрольно-измерительный инструмент. *Материалы:* свинцовые слитки в виде призматических образцов.

### Порядок выполнения лабораторной работы

#### 1. Определение основных параметров, характеризующих деформацию металла при продольной прокатке.

Для определения основных параметров, характеризующих деформацию металла при продольной прокатке: обжатие (абсолютное  $\Delta h$  и относительное  $\varepsilon$ ), уширение (абсолютное  $\Delta b$  и относительное  $\theta$ ) и коэффициент вытяжки  $\lambda$ , студенты производят прокатку призматических образцов на лабораторном стане для продольной прокатки с различной высотой калибра  $H$ . С помощью контрольно-измерительного инструмента студенты определяют геометрические параметры образцов до деформации и после нее: высоту заготовки (начальную  $h_0$  и конечную  $h_1$ ), ширину заготовки (начальную  $b_0$  и конечную  $b_1$ ), длину заготовки (начальную  $l_0$  и конечную  $l_1$ ).

Используя полученные результаты измерений, студенты рассчитывают величины обжатия (абсолютного  $\Delta h$  и относительного  $\varepsilon$ ), уширения (абсолютного  $\Delta b$  и относительного  $\theta$ ) и коэффициента вытяжки  $\lambda$  по формулам (2.5), (2.6), (2.7). Также студенты опреде-

ляют объем заготовки до и после прокатки (соответственно  $V_0$  и  $V_1$ ) по формулам  $V_0 = h_0 b_0 l_0$  и  $V_1 = h_1 b_1 l_1$ .

**2. Расчет возможности захвата заготовки валками при продольной прокатке.**

Согласно выданному индивидуальному заданию (табл. 2.10) студент определяет возможность захвата заготовки валками при продольной прокатке.

Таблица 2.10

Варианты индивидуальных заданий

Номер варианта	Высота исходной заготовки $h_0$ , м	Высота заготовки после прокатки $h_1$ , м	Диаметр валков $D$ , м	Окружная скорость вращения валков $v$ , м/с	Материал валков*	Температура прокатки $t$ , °С
1	0,320	0,275	0,475	4,2	С	1200
2	0,300	0,275	0,475	3,8	Ч	1100
3	0,275	0,225	0,513	3,1	ШС	900
4	0,275	0,225	0,513	2,8	ШЧ	750
5	0,250	0,200	0,510	3,9	С	1100
6	0,250	0,200	0,510	4,0	Ч	1000
7	0,200	0,150	0,530	2,5	ШС	800
8	0,200	0,150	0,530	2,6	ШЧ	900
9	0,200	0,150	0,530	4,1	С	1100
10	0,150	0,125	0,550	3,5	Ч	1200
11	0,150	0,125	0,275	3,4	ШС	950
12	0,150	0,125	0,550	2,6	ШЧ	1000
13	0,145	0,100	0,450	4,0	С	1200
14	0,135	0,100	0,450	3,1	Ч	1200
15	0,130	0,100	0,450	3,5	ШС	900

\*Примечание: С — стальные; Ч — закаленные чугуны; ШС — шлифованные стальные; ШЧ — шлифованные закаленные чугуны.

### Порядок решения задачи

Условие захвата заготовки валками при продольной прокатке выражается неравенством (2.1):  $f > \operatorname{tg} \alpha$ , где  $f$  — коэффициент трения;  $\alpha$  — угол захвата.

Для определения коэффициента трения  $f$  студенты используют формулы (2.2), (2.3), (2.4).

Для определения значения  $\operatorname{tg} \alpha$  студенты анализируют изменения геометрических параметров прокатываемой заготовки при продольной прокатке (рис. 2.52).

Из рисунка 2.52 видно, что

$$\frac{D}{2} - \frac{h_0 - h_1}{2} = \frac{D}{2} \cos \alpha,$$

следовательно,

$$\cos \alpha = 1 - \frac{h_0 - h_1}{D}.$$

Зная значение  $\cos \alpha$ , по известным тригонометрическим формулам находим значение  $\operatorname{tg} \alpha$ :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \alpha}}{\cos \alpha}.$$

Сравнивая рассчитанные значения коэффициента трения  $f$  и  $\operatorname{tg} \alpha$ , студенты делают выводы о возможности (невозможности) захвата заготовки валками при продольной прокатке.

### 3. Оформление результатов работы.

Результаты проведенных измерений геометрических параметров образцов и расчета основных параметров, характеризующих деформацию металла при продольной прокатке, студенты заносят в таблицу 2.11.

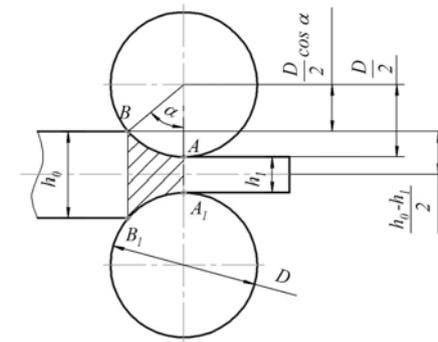


Рис. 2.52. Схема изменения геометрических параметров прокатываемой заготовки при продольной прокатке

Таблица 2.11

## Протокол результатов испытаний

Высота калибра $H$ , мм	Результаты измерений, мм						Результаты расчетов					
	$h_0$	$h_1$	$b_0$	$b_1$	$l_0$	$l_1$	$\Delta h$ , мм	$\varepsilon$ , %	$\Delta b$ , мм	$\theta$ , %	$\lambda$	$V_{1,3}$ мм <sup>3</sup>

По результатам экспериментальных исследований студенты строят графические зависимости параметров ( $\Delta h$ ,  $\varepsilon$ ,  $\Delta b$ ,  $\theta$ ,  $\lambda$ ) от высоты калибра  $H$ .

В отчете студенты приводят расчеты определения возможности (невозможности) захвата заготовки валками согласно индивидуальному заданию. В случае невозможности захвата в выводах студенту необходимо предложить возможные изменения исходных параметров прокатки и дополнительные технологические мероприятия, которые обеспечат выполнение условия захвата заготовки валками.

Из полученных результатов в лабораторной работе следует сделать соответствующие выводы.

**Вопросы для текущего контроля**

(к защите лабораторной работы)

1. Сущность продольной прокатки.
2. Основные параметры, характеризующие деформацию металла при продольной прокатке: обжатие (абсолютное  $\Delta h$  и относительное обжатие  $\varepsilon$ ), уширение (абсолютное  $\Delta b$  и относительное  $\theta$ ) и коэффициент вытяжки  $\lambda$ , и их определение.
3. Формулирование условия захвата заготовки валками при продольной прокатке.
4. Факторы, влияющие на условия захвата заготовки валками при продольной прокатке.

### Лабораторная работа 3. ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА НА ЕГО МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ ВОЛОЧЕНИИ

**Цель работы.** Экспериментально определить основные параметры, характеризующие деформацию металла при волочении, и влияние деформации на механические свойства образцов.

**Подготовка студента к занятию.** Изучить следующие вопросы теоретического материала:

1. Сущность процесса волочения.
2. Устройство волоки.
3. Операции технологического процесса волочения.
4. Основные параметры, характеризующие деформацию металла при волочении.

**Средства обучения. Оборудование и инструменты:** волоки, разрывная машина, контрольно-измерительный инструмент. **Материалы:** отожженная проволока из среднеуглеродистой стали, смазка, наждачная бумага.

#### Порядок выполнения лабораторной работы

##### 1. Определение основных параметров, характеризующих деформацию металла при волочении.

Процесс волочения студенты осуществляют следующим образом. Образцы из отожженной проволоки зачищают от окалины наждачной бумагой и заостряют их концы для последующего продевания через отверстие волоки. Смазывают проволоку и набивают смазкой входную часть волоки. Прodeвают конец проволоки в волоку и закрепляют волоку и проволоку в зажимах разрывной машины. Предварительно протягивают последовательно два образца проволоки через отверстие в первой волоке. Затем один из образцов аналогичным образом вторично протягивают во второй волоке с меньшим отверстием. Полученные протянутые образцы очищают от смазки.

Для определения основных параметров, характеризующих деформацию металла при волочении (коэффициент вытяжки  $\lambda$  и степень деформации (степень обжатия)  $\varepsilon$ ), студенты измеряют диаметры образцов: исходного отожженного ( $d_0$ ) и протянутых ( $d_k$ ).

Коэффициент вытяжки  $\lambda$  и степень деформации (степень обжатия)  $\varepsilon$  студенты определяют по формулам (2.11) и (2.12) соответственно.

## 2. Влияние деформации при волочении металла на его механические свойства.

Исходный образец и два полученных после волочения (соответственно однократного и двукратного) образца разрывают на разрывной машине. Студенты определяют значения величины максимального разрушающего усилия  $P_{\max}$  и предела прочности при растяжении  $\sigma_B$  (как отношение максимального разрушающего усилия  $P_{\max}$  к площади поперечного сечения образца  $F$  до разрушения).

## 3. Оформление результатов работы.

Результаты проведенных измерений геометрических параметров образцов и разрушающего усилия, вычислений основных параметров, характеризующих деформацию металла при волочении, и значения предела прочности при растяжении студенты заносят в таблицу 2.12.

Таблица 2.12

Протокол результатов испытаний

Образец	$d_0$ , мм	$d_k$ , мм	$\lambda$	$\varepsilon$ , %	$P_{\max}$ , МПа	$F$ , мм <sup>2</sup>	$\sigma_B$ , МПа
Исходный		–	–	–			
Однократное волочение							
Двукратное волочение							

По полученным результатам следует сделать выводы о влиянии деформации металла на его механические свойства при волочении.

### Вопросы для текущего контроля (к защите лабораторной работы)

1. Сущность процесса волочения.
2. Основные операции процесса волочения.
3. Основные параметры, характеризующие деформацию металла при волочении (коэффициент вытяжки  $\lambda$  и степень деформации  $\varepsilon$ ), и их определение.
4. Влияние степени деформации металла на его механические свойства при волочении.

## МАТЕРИАЛЫ К УПРАВЛЯЕМОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

### Тема «РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОВКИ КОНКРЕТНОЙ ДЕТАЛИ»

В соответствии с индивидуальным заданием (табл. 2.13) студенты рассчитывают поковку и определяют маршрут технологического процесса ковки в следующей последовательности:

1. Определение объема и массы поковки.
2. Определение объема и массы исходной заготовки.
3. Определение размеров исходной заготовки.
4. Выбор температурного интервала ковки.
5. Определение продолжительности нагрева исходной заготовки.
6. Определение массы падающих частей молота.
7. Выбор основных технологических операций и рабочего инструмента для изготовления заданной поковки.
8. Составление маршрутной карты технологического процесса изготовления поковки.

#### Определение объема и массы поковки.

Расчет начинается с выполнения эскиза поковки. Эскиз выполняется в масштабе, самостоятельно выбранном студентом. Указываются номер задания, название поковки, ее размеры, марка стали, из которой выполняется поковка, требуемое количество поковок.

Для расчета объема поковки определяют объемы простых геометрических фигур ( $V_1 \dots V_n$ ), из которых она состоит. Объем поковки  $V_{\text{пок}}$  представляет собой сумму объемов отдельных ее элементов:

$$V_{\text{пок}} = V_1 + V_2 + \dots + V_n. \quad (2.13)$$

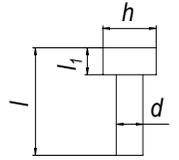
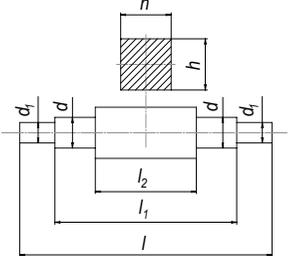
Масса поковки определяется по формуле

$$M_{\text{пок}} = V_{\text{пок}} \cdot \rho, \quad (2.14)$$

где  $\rho$  — плотность металла поковки (для большинства марок сталей  $\rho = 7,86 \text{ г/см}^3$ ).

Таблица 2.13

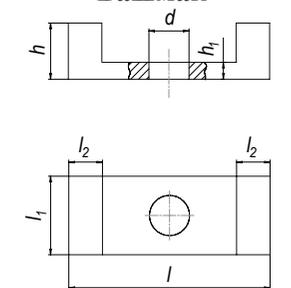
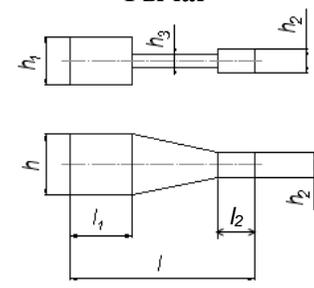
## Варианты индивидуальных заданий

№ п/п	Марка стали	Кол-во поковок	Геометрические параметры										Эскиз поковки
			$l$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$h$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$d$	$d_1$	
$l$	$2$	$3$	$4$	$5$	$6$	$7$	$8$	$9$	$10$	$11$	$12$	$13$	$14$
1	Сталь 20	8	150	20	—	—	30	—	—	—	20	—	<p><b>Болт</b></p> 
2	Сталь 30	15	110	12	—	—	25	—	—	—	18	—	
3	Сталь 40	7	100	8	—	—	20	—	—	—	15	—	
4	Сталь 40	1	250	180	100	—	50	—	—	—	30	20	<p><b>Ось</b></p> 
5	Сталь 45	3	300	230	150	—	55	—	—	—	40	30	
6	Сталь 50	5	400	300	260	—	80	—	—	—	60	50	

Продолжение таблицы 2.13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
7	Сталь 10	5	100	70	-	-	40	-	-	-	30	-	<p><b>Фланец</b></p>
8	Сталь 15	6	80	55	-	-	30	-	-	-	20	-	
9	Сталь 25	8	110	75	-	-	45	-	-	-	35	-	
10	Сталь 40	5	100	25	-	-	50	25	-	-	17	-	<p><b>Тяга</b></p>
11	Сталь 50	10	200	50	-	-	100	50	-	-	35	-	
12	Сталь 55	4	250	60	-	-	120	60	-	-	45	-	

Продолжение таблицы 2.13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
13	Сталь 20	3	150	50	25	–	40	12	–	–	15	–	<p><b>Башмак</b></p> 
14	Сталь 30	7	300	100	45	–	75	25	–	–	30	–	
15	Сталь 35	10	250	85	35	–	65	20	–	–	25	–	
16	Сталь 40	10	150	50	30	–	50	40	20	10	–	–	<p><b>Рычаг</b></p> 
17	Сталь 45	3	350	115	70	–	95	90	45	20	–	–	
18	Сталь 50	1	400	135	80	–	135	100	50	25	–	–	

Окончание таблицы 2.13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
19	Сталь 55	1	200	180	80	60	10	-	-	-	-	-	<p><b>Скоба</b></p>
20	Сталь 60	5	150	135	45	35	7	-	-	-	-		
21	Сталь 65	10	300	270	90	70	15	-	-	-	-		
22	Сталь У8А	3	200	60	20	-	25	15	10	-	-	-	<p><b>Зубило</b></p>
23	Сталь У7А	10	250	75	25	-	30	18	13	-	-	-	
24	Сталь У11А	1	320	100	35	-	45	30	25	-	-	-	

### Определение объема и массы исходной заготовки.

Объем исходной заготовки рассчитывают с учетом потерь металла на угар и обсечку по следующей формуле:

$$V_{\text{исх}} = V_{\text{пок}} + V_{\text{уг}} + V_{\text{обс}},$$

где  $V_{\text{исх}}$  — объем исходной заготовки, см<sup>3</sup>;  $V_{\text{уг}}$  — объем потери металла на угар, см<sup>3</sup>;  $V_{\text{обс}}$  — объем потери металла на обсечку, см<sup>3</sup>.

Суммарное значение объема потерь металла на угар и обсечку зависит от конфигурации поковки и может быть определено из равенства

$$V_{\text{уг}} + V_{\text{обс}} = V_{\text{пок}}\beta,$$

где  $\beta$  — относительная доля потерь на угар и обсечку от общего объема поковки.

Отсюда

$$V_{\text{исх}} = V_{\text{пок}} + \beta V_{\text{пок}} = V_{\text{пок}}(1 + \beta). \quad (2.15)$$

Значения величин  $\beta$  для поковок различной конфигурации представлены в таблице 2.14.

Таблица 2.14

Значения величины  $\beta$  для поковок различной конфигурации

Конфигурация поковки	$\beta$
Глухие фланцы, пластины, кубики, бруски	0,015...0,025
Фланцы с отверстием, хомуты, подвески, гайки	0,02
Гладкие валы, вилки	0,05...0,07
Валы и валики с односторонними уступами или фланцами, болты, шпонки, башмаки, траверсы, зубила кузнечные	0,07...0,1
Валы и валики с двусторонними уступами или буртиками, оси, шпиндели, тяги, серьги, скобы	0,1...0,15
Гаечные ключи, поковки типа шатунов	0,15...0,18
Рычаги, сложные шатуны, кривошипцы	0,18...0,25
Коленчатые валы, рычаги кривые и двуплечие	0,25...0,30

Масса исходной заготовки  $M_{\text{исх}}$  определяется по формуле

$$M_{\text{исх}} = V_{\text{исх}} \cdot \rho. \quad (2.16)$$

**Определение размеров исходной заготовки.**

В качестве исходных заготовок для получения поковок используются отливки или прокат. В данной работе в качестве исходного материала для заготовки под поковку следует использовать сортовую горячекатаную сталь (ГОСТ 2590-88), стандартными диаметрами  $d_{\text{сорт}}$  которой являются: 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 60, 62, 63, 65, 67, 68, 70, 72, 75, 78, 80, 82, 85, 87, 90, 92, 95, 97 и 100 мм.

Если первой технологической операцией получения поковки будет протяжка или осадка, то диаметр исходной заготовки  $d_{\text{исх}}$  можно определить следующим образом. Площадь поперечного сечения исходной заготовки  $S_{\text{исх}}$  приравняем к площади максимального поперечного сечения поковки после первой операции  $S_{\text{max}}$  с учетом коэффициента уковки  $Y_{\text{к}}$ . Тогда

$$S_{\text{исх}} = S_{\text{max}} \cdot Y_{\text{к}}.$$

Зная, что  $S_{\text{исх}} = \frac{\pi d_{\text{исх}}^2}{4}$ , получим

$$d_{\text{исх}} = \sqrt{\frac{4S_{\text{max}} Y_{\text{к}}}{\pi}}. \quad (2.17)$$

Расчетное значение  $d_{\text{исх}}$  сравнивается со значением  $d_{\text{сорт}}$ . Если  $d_{\text{исх}}$  не равно  $d_{\text{сорт}}$ , то выбирается численное наиболее близкое значение  $d_{\text{сорт}}$  из условия  $d_{\text{сорт}} \geq d_{\text{исх}}$ .

Длина исходной заготовки  $L_{\text{исх}}$  определяется по формуле

$$L_{\text{исх}} = \frac{V_{\text{исх}}}{S_{\text{сорт}}}, \quad (2.18)$$

где  $S_{\text{сорт}}$  — площадь поперечного сечения сортового проката, равная

$$S_{\text{сорт}} = \frac{\pi d_{\text{сорт}}^2}{4}.$$

#### Выбор температурного интервалаковки.

Температурный интервалковки для углеродистых сталей определяется по диаграмме состояния Fe–C (рис. 2.9).

#### Определение продолжительности нагрева исходной заготовки.

Время нагрева  $\tau$  определяют по формуле Н. Н. Доброхотова

$$\tau = \alpha k d \sqrt{d} \text{ (ч)}, \quad (2.19)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, учитывающий способ укладки заготовок в печи (рис. 2.53);  $k$  — коэффициент, зависящий от марки стали (для углеродистых и низколегированных сталей  $k = 10$ , для высокоуглеродистых и высоколегированных сталей  $k = 20$ );  $d$  — диаметр заготовки, м.

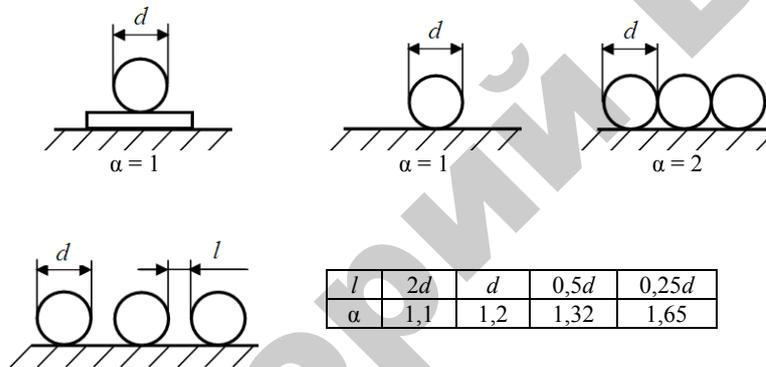


Рис. 2.53. Зависимость коэффициента  $\alpha$  от способа укладки заготовок в печи

#### Определение массы падающих частей молота.

Масса падающих частей молота  $G$  в зависимости от массы исходной заготовки  $M_{\text{исх}}$  или диаметра сортового проката  $d_{\text{сорт}}$  исходной заготовки определяется по таблице 2.15.

Таблица 2.15

Зависимость массы падающих частей пневматического молота  
от массы заготовки и диаметра сортового проката

Масса падающих частей молота $G$ , кг	Масса исходной заготовки $M_{\text{исх}}$ , кг		$d_{\text{сорт}}$ , мм
	средняя	наибольшая	
75	0,3	1,2	45
150	1,5	4,0	60
250	2,5	8,0	75
400	6,0	18,0	100
560	9,0	28,0	120
750	12,0	40,0	135
1 000	20,0	70,0	160

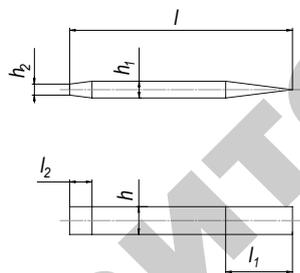
**Выбор основных технологических операций и рабочего инструмента для изготовления заданной поковки.**

В зависимости от конфигурации поковки производится выбор технологических операций и необходимого инструмента для ее получения. Порядок выполнения операций и необходимый для этого инструмент приводятся в соответствующей маршрутной карте технологического процесса изготовления поковки.

**Составление маршрутной карты технологического процесса изготовления поковки.**

При составлении маршрутной карты технологического процесса в логической последовательности назначаются операции и переходы, выполняются эскизы каждого перехода с необходимыми размерами, указываются использованные оборудование и инструмент.

**Пример выполнения индивидуального задания**



**Вариант 22**

Наименование поковки —

зубило кузнечное

Марка стали — У8А

Количество поковок — 3 шт.

Геометрические параметры (мм):

$l = 200$ ;  $l_1 = 60$ ;  $l_2 = 20$ ;  $h = 25$ ;

$h_1 = 15$ ;  $h_2 = 10$

### 1. Определение объема и массы поковки.

Элементы поковки — треугольная призма ( $V_1$ ), прямоугольная призма ( $V_2$ ), усеченная призма ( $V_3$ ):

$$V_1 = \left(\frac{1}{2} h_1 l_1\right) h; \quad V_2 = (l - (l_1 + l_2)) h h_1; \quad V_3 = \frac{1}{2} (h_1 + h_2) l_2 h.$$

Определяем объем поковки по формуле (2.13):

$$V_{\text{пок}} = V_1 + V_2 + V_3 = \left( \left( \frac{1}{2} \cdot 15 \cdot 60 \right) \cdot 25 \right) + \left( (200 - (60 + 20)) \cdot 25 \cdot 15 \right) + \left( \frac{1}{2} (15 + 10) \cdot 20 \cdot 25 \right) = 62\,500 \text{ мм}^3 = 62,5 \text{ см}^3.$$

Определяем массу поковки по формуле (2.14):

$$M_{\text{пок}} = V_{\text{пок}} \cdot \rho = 62,5 \cdot 7,86 = 491 \text{ г.}$$

$$V_{\text{пок}} = 62,5 \text{ см}^3; \quad M_{\text{пок}} = 491 \text{ г.}$$

### 2. Определение объема и массы исходной заготовки.

Объем исходной заготовки определяем по формуле (2.15):

$$V_{\text{исх}} = V_{\text{пок}} (1 + \beta) = 62,5(1 + 0,07) = 66,9 \text{ см}^3.$$

Массу исходной заготовки определяем по формуле (2.16):

$$M_{\text{исх}} = V_{\text{исх}} \rho = 66,9 \cdot 7,86 = 526 \text{ г.}$$

$$V_{\text{исх}} = 66,9 \text{ см}^3; \quad M_{\text{исх}} = 526 \text{ г.}$$

### 3. Определение размеров исходной заготовки.

Диаметр исходной заготовки рассчитываем по формуле (2.17), принимая площадь поперечного сечения поковки после первой операции (протяжки) равной  $F_{\text{max}} = h_1 h$ :

$$d_{\text{исх}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{max}} Y_{\text{к}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4h_1 h Y_{\text{к}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 15 \cdot 20 \cdot 1,3}{3,14}} = 22,3 \text{ мм.}$$

Сравнивая расчетное значение  $d_{\text{исх}}$  с  $d_{\text{сорт}}$  по ГОСТ 2590-88, принимаем  $d_{\text{сорт}} = 23 \text{ мм}$ .

Длину исходной заготовки определяем по формуле (2.18):

$$L_{\text{исх}} = \frac{V_{\text{исх}}}{S_{\text{сорт}}} = \frac{V_{\text{исх}}}{\frac{\pi d_{\text{сорт}}^2}{4}} = \frac{66\,900}{\frac{3,14 \cdot 23^2}{4}} = 161 \text{ мм.}$$

$$d_{\text{сорт}} = 23 \text{ мм}; \quad L_{\text{исх}} = 161 \text{ мм.}$$

#### 4. Выбор температурного интервалаковки.

Температурный интервалковки определяем по диаграмме Fe–C (рис. 2.9). Для стали У8А (0,8 % углерода) температура началаковки  $t_{\text{н}} = 1\,200 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура концаковки  $t_{\text{к}} = 790 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$t_{\text{н}} = 1\,200 \text{ }^\circ\text{C}, \quad t_{\text{к}} = 790 \text{ }^\circ\text{C.}$$

#### 5. Определение продолжительности нагрева исходной заготовки.

Время нагрева определяем по формуле (2.19). Заготовки диаметром  $d_{\text{сорт}} = 23 \text{ мм}$  расположим в печи на расстоянии  $l = d_{\text{сорт}}$ . В этом случае, исходя из рисунка 2.48,  $\alpha$  принимаем равным 1,2. Для стали У8А значение  $k$  принимаем равным 20. Тогда

$$\tau = \alpha k d \sqrt{d} = \tau = \alpha k d_{\text{сорт}} \sqrt{d_{\text{сорт}}} = 1,2 \cdot 20 \cdot 0,023 \cdot \sqrt{0,023} = 0,084 \text{ ч.}$$

$$\tau = 0,084 \text{ ч.}$$

#### 6. Определение массы падающих частей молота.

Для заготовки массой  $M_{\text{исх}} = 526 \text{ г} \approx 0,53 \text{ кг}$  и диаметром  $d_{\text{сорт}} = 23 \text{ мм}$  массу падающих частей молота  $G$ , исходя из данных таблицы 15, принимаем равной 75 кг.

$$G = 75 \text{ кг.}$$

**7. Выбор основных технологических операций и рабочего инструмента для изготовления заданной поковки.**

При изготовлении поковки зубила используем следующие основные технологические операции: отрубка и протяжка. Рабочий инструмент и оборудование: пневматический молот, плоские бойки, наковальня, кувалда, топор, гладилка, клещи, кронциркуль, линейка.

**8. Составление маршрутной карты технологического процесса изготовления поковки.**

Маршрутная карта технологического процессаковки зубила приведена на рисунке 2.54.

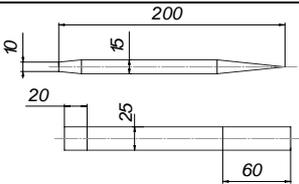
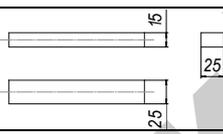
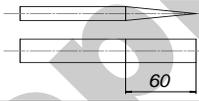
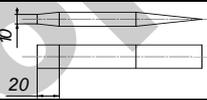
Эскиз поковки		Эскиз заготовки
 <p>Сталь У8А, 10 шт.</p>		
Операция, переход	Эскиз перехода	Оборудование, инструмент
Нагрев $t_H = 1\ 200\ ^\circ\text{C}$		Горн, клещи
Отрубка мерной части заготовки $l_{\text{исх}} = 161\ \text{мм}$		Наковальня, кувалда, топор, линейка, клещи
Протяжка на полосу		Пневматический молот, плоские бойки, кронциркуль, клещи
Нагрев $t_H = 1\ 200\ ^\circ\text{C}$		Горн, клещи
Протяжка боковых граней рабочей (рубящей) части		Плоские бойки, клиновья подкладка, клещи
Протяжка ударяемой части		Наковальня, кувалда, клещи, обжимка
Отделка поковки		Наковальня, кувалда, гладилка

Рис. 2.54. Пример маршрутной карты технологического процесса

## РАЗНОУРОВНЕВЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО МОДУЛЮ 2

Билет для разноуровневого контроля знаний по модулю имеет следующую структуру:

1) уровень I (репродуктивный): компьютерное тестирование (6 тестовых заданий). Правильный ответ оценивается в 0,5 балла.

2) уровень II (продуктивный): 2 вопроса. В зависимости от полноты и качества ответа студента оценка равняется 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 балла за каждый вопрос.

3) уровень III (творческий): решение задачи повышенной трудности. Максимальная оценка — 3 балла.

### Уровень I (репродуктивный)

1. Операция уменьшения высоты заготовки при увеличении площади поперечного сечения называется:

- 1) осадка;
- 2) высадка;
- 3) протяжка.

2. Деформация осаживаемой заготовки не по всей ее высоте называется:

- 1) осадка;
- 2) высадка;
- 3) протяжка.

3. Операция удлинения заготовки или ее части за счет уменьшения площади поперечного сечения называется:

- 1) осадка;
- 2) протяжка;
- 3) разгонка.

4. Минимальной температурой, при которой в структуре деформированного металла

зарождаются и растут новые зерна с недеформированной структурой, является:

- 1) температура рекристаллизации;
- 2) температура плавления;
- 3) температура кристаллизации.

5. Операция увеличения ширины части заготовки за счет уменьшения ее толщины называется:

- 1) разгонка;
- 2) протяжка;
- 3) высадка.

6. Дефект поволоков при нагреве заготовок до температуры выше оптимального интервала горячей обработки давлением называется:

- 1) перегрев;
- 2) пережог;
- 3) волокнистая структура.

7. Процесс образования и роста новых равноосных зерен из деформированных зерен называется:
- 1) возврат;
  - 2) полигонизация;
  - 3) кристаллизация.
8. Упрочнение металла в процессе холодной пластической деформации называется:
- 1) рекристаллизация;
  - 2) наклеп;
  - 3) возврат.
9. Дефект поковок при нагреве заготовок до температуры, близкой к температуре плавления, называется:
- 1) перегрев;
  - 2) пережог;
  - 3) волокнистая структура.
10. Деформация, проводимая при температуре выше температуры рекристаллизации, называется:
- 1) остаточной;
  - 2) холодной;
  - 3) горячей.
11. Деформация, проводимая при температуре ниже температуры рекристаллизации, называется:
- 1) остаточной;
  - 2) холодной;
  - 3) горячей.
12. Пластичность стали с увеличением температуры обработки
- 1) уменьшается;
  - 2) повышается;
  - 3) не изменяется.
13. Параметром, с увеличением которого пластичность металла увеличивается, а сопротивление деформации уменьшается, является:
- 1) температура обработки;
  - 2) содержание углерода в стали;
  - 3) скорость деформации.
14. Пластичность стали с увеличением скорости деформации
- 1) повышается;
  - 2) уменьшается;
  - 3) не изменяется.
15. Пластичность стали с увеличением содержания углерода и легирующих элементов
- 1) уменьшается;
  - 2) увеличивается;
  - 3) не изменяется.
16. Способ обработки металлов давлением при получении проволоки называется:
- 1) прессование;
  - 2) специальные виды штамповки;
  - 3) волочение.
17. Для получения сортового проката используется
- 1) продольная прокатка;
  - 2) поперечная прокатка;
  - 3) поперечно-винтовая прокатка.
18. Способ обработки металлов давлением при получении поковок массой до 250 тонн и более называется:

- 1) прессование;
  - 2) штамповка;
  - 3) ковка.
19. Для получения листового проката используется
- 1) продольная прокатка;
  - 2) поперечная прокатка;
  - 3) поперечно-винтовая прокатка.
20. Для получения специальных периодических профилей используется
- 1) продольная прокатка;
  - 2) поперечная прокатка;
  - 3) поперечно-винтовая прокатка.
21. Для получения пустотелых трубных заготовок используется
- 1) продольная прокатка;
  - 2) поперечная прокатка;
  - 3) поперечно-винтовая прокатка.
22. Закон, используемый для определения размера исходной заготовки, называется:
- 1) закон наименьшего сопротивления;
  - 2) закон наименьшего периметра;
  - 3) закон постоянства объемов.
23. Допустимые отклонения размеров поковки от номинальных называются:
- 1) припусками;
  - 2) допусками;
  - 3) напусками.
24. Закрытый штамп — это штамп, у которого
- 1) имеется облойная канавка;
  - 2) разъем происходит по плоскости;
  - 3) нет облойной канавки.
25. Недостатком закрытых штампов является:
- 1) повышенный расход металла;
  - 2) необходимость расходов на обрезку облоя;
  - 3) необходимость точного соблюдения размеров заготовки.
26. Элемент поковки для упрочнения ее формы называется:
- 1) припуском;
  - 2) допуском;
  - 3) напуском.
27. Открытый штамп — это штамп, у которого
- 1) имеется облойная канавка;
  - 2) нет облойной канавки;
  - 3) разъем происходит по сложной поверхности.
28. Рабочий инструмент при прессовании — это:
- 1) штамп;
  - 2) матрица;
  - 3) валки.
29. Рабочий инструмент при прокатке — это:
- 1) валки;
  - 2) штамп;
  - 3) матрица.

30. При обратном прессовании направление истечения металла
- 1) совпадает с направлением движения пуансона;
  - 2) противоположно направлению движения пуансона;
  - 3) совпадает с направлением движения матрицы.
31. При прямом прессовании направление истечения металла
- 1) совпадает с направлением движения пуансона;
  - 2) противоположно направлению движения пуансона;
  - 3) совпадает с направлением движения матрицы.
32. Преимуществом обратного метода прессования (по сравнению с прямым) является:
- 1) меньший процент отхода металла;
  - 2) более высокий класс чистоты поверхности получаемого изделия;
  - 3) более высокий класс размерной точности получаемого изделия.
33. Твердость и прочность металла при наклепе
- 1) не изменяется;
  - 2) уменьшается;
  - 3) увеличивается.
34. Пластичность и ударная вязкость при наклепе
- 1) не изменяется;
  - 2) увеличивается;
  - 3) уменьшается.
35. Процесс выдавливания металла нагретой заготовки из замкнутой полости контейнера называется:
- 1) прессованием;
  - 2) штамповкой;
  - 3) волочением.
36. Для использования горячей объемной штамповки применяют:
- 1) единичное производство;
  - 2) серийное производство;
  - 3) любое производство.
37. Около 80 % выплавляемой стали и до 55 % сплавов из цветных металлов подвергается обработке металлов давлением:
- 1) методом объемной листовой штамповки;
  - 2) методом прокатки;
  - 3) методом прессования.
38. Обработке металлов давлением не подвергается:
- 1) сталь;
  - 2) ковкий чугун;
  - 3) дюралюминий.
39. Механизмом пластической деформации монокристалла является:
- 1) фазовая перекристаллизация;
  - 2) анизотропия;
  - 3) скольжение.
40. Наиболее рациональным способом массового производства крепежных изделий

(болты, винты, гвозди и др.) является:

- 1) холодная объемная штамповка;
- 2) поперечная прокатка;
- 3) прессование.

41. При холодной обработке металлов давлением

- 1) уменьшается объем;
- 2) повышается плотность;
- 3) повышается твердость и прочность.

42. Характеристикой пластичности является:

- 1) предел прочности при растяжении;
- 2) относительное удлинение;
- 3) ударная вязкость.

43. Нагрев заготовок перед обработкой металлов давлением производится

- 1) в методических печах;
- 2) в электродуговых печах;
- 3) в вагранке.

44. Основным требованием, предъявляемым к нагреву стальных заготовок, является:

- 1) минимальная температура нагрева;
- 2) равномерный нагрев всего объема заготовки;
- 3) быстрый нагрев.

45. Основными видами прокатки являются:

- 1) продольная, продольно-поперечная, поперечная;
- 2) продольная, поперечная, поперечно-винтовая;

3) продольная, поперечная, продольно-винтовая.

46. К профилям сортового проката относятся:

- 1) круг, шестигранник, квадрат;
- 2) круг, рельс, лист;
- 3) круг, швеллер, труба.

47. К специальным видам проката относятся:

- 1) шестигранные заготовки, шары, рельсы;
- 2) швеллер, заготовки периодического профиля, ходовой винт;
- 3) шары, заготовки периодического профиля, ходовой винт.

48. Основными видами прессования являются:

- 1) прямое и обратное;
- 2) поперечное и продольное;
- 3) вертикальное и горизонтальное.

49. Материалом для изготовления фильеры (волоки) является:

- 1) нержавеющая конструкционная сталь;
- 2) бронза;
- 3) инструментальная сталь.

50. Микроструктура в процессе рекристаллизации:

- 1) не изменяется;
- 2) в ней образуются равноосные зерна;
- 3) уменьшается вытянутость зерен.

51. Основной продукцией волочильных станов является:
- 1) рельс;
  - 2) винтовой профиль;
  - 3) проволока.
52. Деформация называется холодной
- 1) при комнатной температуре;
  - 2) при температуре ниже температуры рекристаллизации;
  - 3) при температуре выше температуры рекристаллизации.
53. Рекристаллизацией называется:
- 1) изменение механических свойств при нагреве;
  - 2) образование волокнистой структуры;
  - 3) образование новых равноосных зерен взамен старых волокнистых.
54. При возврате прочностные свойства
- 1) повышаются;
  - 2) понижаются;
  - 3) не изменяются.
55. При наклепе прочностные свойства металлов и сплавов
- 1) повышаются;
  - 2) понижаются;
  - 3) не изменяются.
56. Горячей называется деформация
- 1) при повышенных температурах;
  - 2) при температурах выше температуры рекристаллизации;
  - 3) при температуре выше комнатной.
57. Структура деформированного металла в процессе возврата
- 1) изменяется с укрупнением зерна;
  - 2) изменяется с измельчением зерна;
  - 3) не изменяется.
58. Наклеп — это:
- 1) изменение размеров зерен в ходе деформации;
  - 2) явление упрочнения металла в ходе холодной пластической деформации;
  - 3) изменение формы и размеров тела в ходе деформации.
59. Пластичность при рекристаллизации
- 1) не изменяется;
  - 2) повышается;
  - 3) понижается.
60. Пластические свойства при возврате
- 1) повышаются;
  - 2) понижаются;
  - 3) не изменяются.
61. При поперечной прокатке
- 1) валки вращаются в противоположные стороны;
  - 2) заготовка перемещается перпендикулярно оси вращения валков;

- |   |                                    |
|---|------------------------------------|
| 3) валки вращаются в одну сторону.            | 2) валки вращаются в одну сторону; |
| 62. При продольной прокатке                   | 3) заготовка перемещается          |
| 1) валки вращаются в противоположные стороны; | вдоль оси вращения валков.         |

### Уровень II (продуктивный)

1. Что такое обработка металлов давлением? Холодная и горячая обработка металлов давлением.
2. Что такое наклеп, возврат и рекристаллизация?
3. Температурный интервал горячей обработки металлов давлением. Перегрев и пережог.
4. Что такое прессование? Виды прессования.
5. Что такое волочение? Приведите схему процесса и инструмента для волочения.
6. Что такое прокатка? Приведите схемы основных способов прокатки.
7. Назовите назначение и наименование конструктивных элементов валка прокатного стана. Что такое калибр?
8. Назовите основное оборудование прокатного производства. Приведите схему прокатного стана.
9. Назовите вспомогательное оборудование прокатного производства.
10. Классификация прокатных станов продольной прокатки.
11. Что такое ковка? Перечислите основные операции ковки.
12. Инструмент и оборудование, используемые при ковке.
13. Что такое штамповка? Горячая объемная штамповка в открытых штампах.
14. Что такое штамповка? Горячая объемная штамповка в закрытых штампах.
15. Сущность процесса холодной объемной штамповки. Разновидности этого вида обработки металлов давлением.
16. Сущность процесса листовой штамповки. Разделительные и формообразующие операции этого вида обработки металлов давлением.
17. Специальные способы листовой штамповки.

### Уровень III (творческий)

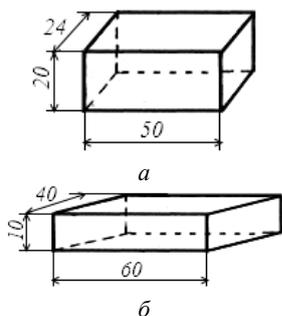


Рис. 2.55. Геометрические параметры заготовки: *a* — до прокатки; *б* — после прокатки

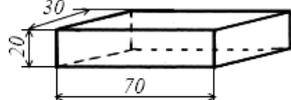


Рис. 2.56. Геометрические параметры заготовки после прокатки

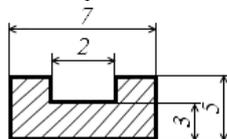


Рис. 2.57 Форма и размеры поперечного сечения изделия, полученного волочением

1. Определить показатели, характеризующие степень деформации заготовки при продольной прокатке: обжатие (абсолютное  $\Delta h$  и относительное  $\epsilon$ ), уширение (абсолютное  $\Delta b$  и относительное  $\theta$ ) и коэффициент вытяжки  $\lambda$ . Геометрические параметры заготовки до и после прокатки представлены на рисунке 2.55.

2. Определить размеры исходной заготовки до прокатки, если значение абсолютного обжатия  $\Delta h = 15$  мм, а коэффициент вытяжки  $\lambda = 1,4$ . Геометрические параметры заготовки после прокатки представлены на рисунке 2.56.

3. Определить степень деформации (степень обжатия)  $\epsilon$  заготовки и длину полученного волочением изделия (рис. 2.57), если начальная длина заготовки прямоугольного сечения равна 15 мм, а ширина и высота 8 и 6 мм соответственно.

4. Рассчитать возможность захвата стальной заготовки высотой  $h_0 = 150$  мм закаленными чугунами валками диаметром  $D = 550$  мм при продольной прокатке. Окружная скорость вращения валков  $v = 3,5$  м/с, температура прокатки  $t = 1200$  °С, высота заготовки после прокатки  $h_1 = 125$  мм.

5. Определить температурный интервалковки (рис. 2.9) и продолжительность нагрева заготовки из стали У7А диаметром  $d = 50$  мм.

6. Определить температурный интервалковки (рис. 2.9) и продолжительность нагрева заготовки из стали 35 диаметром  $d = 23$  мм.

7. Рассчитать возможность захвата стальной заготовки высотой  $h_0 = 200$  мм стальными валками диаметром  $D = 530$  мм при продольной прокатке. Окружная скорость вращения валков  $v = 4,1$  м/с, температура прокатки  $t = 1100$  °С, высота заготовки после прокатки  $h_1 = 150$  мм.

8. Определить массу исходной заготовки для получения стальной поковки (рис. 2.58) методомковки, если относительная доля потерь на угар и обсечку  $\beta = 0,07$ . Плотность стали  $\rho = 7,86 \text{ г/см}^3$ .

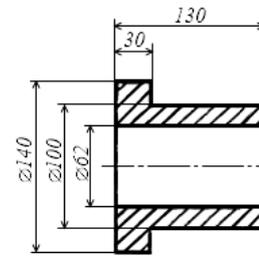


Рис. 2.58. Эскиз поковки

9. Определить массу исходной заготовки для получения стальной поковки (рис. 2.59) методомковки, если относительная доля потерь на угар и обсечку  $\beta = 0,12$ . Плотность стали  $\rho = 7,86 \text{ г/см}^3$ .

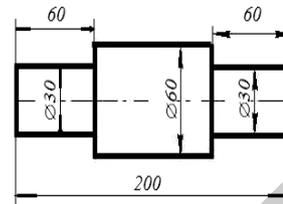


Рис. 2.59. Эскиз поковки

10. Определить размеры исходной заготовки (диаметр  $d_{\text{исх}}$  и длину  $l_{\text{исх}}$  проката круглого поперечного сечения) для получения поковки (рис. 2.60), если относительная доля потерь на угар и обсечку  $\beta = 0,02$ , а коэффициент уковки  $U_k$  равен 1,3.

11. Определить площадь сечения контейнера  $F_k$  при прямом прессовании цилиндрических изделий диаметром 4 мм, если количество отверстий в матрице равно 15, а коэффициент вытяжки  $\lambda$  равен 30.

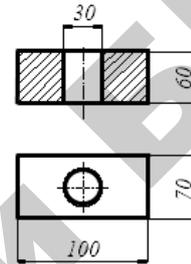


Рис. 2.60. Эскиз поковки

12. Определить коэффициент вытяжки  $\lambda$  и степень деформации  $\epsilon$  при прямом прессовании трубок наружным диаметром 8 мм и внутренним — 6 мм, если внутренний диаметр контейнера равен 300 мм, а количество отверстий матрицы равно 10.

13. Определить скорость истечения металла  $v_n$  из отверстия в матрице при прямом прессовании цилиндрических изделий диаметром 10 мм, если внутренний диаметр контейнера равен 400 мм, скорость прессования составляет  $v_n = 8 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$ , а количество отверстий в матрице равно 8.

14. Определить коэффициент вытяжки  $\lambda$  и степень деформации (степень обжатия)  $\epsilon$  заготовки при волочении, если диаметр исходной заготовки  $d_0 = 10 \text{ мм}$ , а полученное изделие имеет поперечное сечение в форме полукруга ( $d_k = 8 \text{ мм}$ ).

15. Определить диаметр исходной заготовки  $d_0$  при волочении, если поперечное сечение полученного изделия имеет форму квадрата со стороной, равной 5 мм, а коэффициент вытяжки  $\lambda$  равен 1,3.

### МОДУЛЬ 3. СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В результате изучения модуля студент должен:

- **знать** сущность основных видов сварки плавлением и сварки давлением, технологии пайки, напыления и наплавки материалов;
- **уметь** выбирать виды сварки, оборудования и другой технологической оснастки в зависимости от условий реализации процесса сварки.

#### Тематический план модуля 3

Наименование занятия, перечень основных вопросов	Количество аудиторных часов			
	Всего	Лекции	Лабораторные занятия	УСРС
<i>1</i>	2	3	4	5
<i>Физические основы сварки. Дуговые методы сварки</i> 1. Классификация способов сварки. Типы сварных соединений и сварные швы. 2. Зона термического влияния и свариваемость металла. 3. Дуговые методы сварки	2	2		
<i>Изучение структуры сварного соединения</i> 1. Макроструктурный анализ сварного соединения. 2. Микроструктурный анализ сварного соединения. 3. Определение твердости сварного соединения	2		2	
<i>Разработка технологического процесса ручной дуговой сварки сварного узла (управляемая самостоятельная работа студентов)</i>	2			2
<i>Газовая сварка. Контактные способы сварки</i> 1. Газовая сварка. 2. Контактные способы сварки	2	2		
<i>Расчет процесса точечной сварки и оценка качества сварного соединения</i> 1. Выбор режимов точечной сварки. 2. Изготовление экспериментальных образцов. 3. Оценка качества сварного соединения.	2		2	

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Специальные способы сварки. Термическая резка, пайка, наплавка и напыление металлов</i> 1. Специальные способы сварки. 2. Термическая резка металлов. 3. Пайка металлов. 4. Наплавка и напыление металлов	2	2		
<i>Анализ структуры и механических свойств паяного соединения</i> 1. Изготовление экспериментальных образцов. 2. Изучение микроструктуры паяного и сварного соединений. 3. Определение прочности паяного и сварного соединений.	2		2	
<i>Наплавка и напыление (реферат)</i> 1. Способы наплавки. 2. Материалы, применяемые для наплавочных работ. 3. Методы напыления	2			2
<i>Контроль по модулю</i>	2			2
<b><i>Итого по модулю 3</i></b>	<b>18</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>

### 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СВАРКИ. ДУГОВЫЕ МЕТОДЫ СВАРКИ

#### 1.1. Классификация способов сварки.

##### Типы сварных соединений и сварные швы

В разработке методов получения неразъемных соединений металлов и сплавов (в частности, сварки) ведущая роль принадлежит российским инженерам и ученым. Явление дугового электрического разряда в газе (электрическая дуга) было открыто в 1802 г. профессором Петербургской медико-хирургической академии В. В. Петровым (1761–1834), который указал на возможность применения этого разряда для электрического освещения и плавки металлов.

Дуговой электрический разряд для сварки впервые применил Н. Н. Бенардос (1842–1905). Он использовал неплавящийся угольный электрод для соединения свинцовых пластин аккумуляторов. Этот способ сварки Н. Н. Бенардос продемонстрировал на всемирной выставке в Париже в 1881 г. Официально его изобретение сварки было признано в 1882 г., а патент на «Способ соединения и разъединения металлов непосредственным действием электрического тока» был выдан в 1885 г. *Сущность способа сварки по Бенардосу — сварка неплавящимся электродом.*

В 1888 г. Н. Г. Славянов (1854–1897) разработал и применил способ сварки металлическим электродом, который плавился и непосредственно участвовал в формировании металлического шва. *Сущность сварки по Славянову — сварка плавящимся электродом.*

Предложенные Н. Н. Бенардосом и Н. Г. Славяновым новые методы получения неразъемных соединений явились основой всех создаваемых способов дуговой сварки. Их усовершенствование шло по двум направлениям: поиск средств защиты и металлургической обработки металла сварочной ванны, а также автоматизация процесса сварки.

Шведский ученый О. Кьельберг (1870–1931) в 1911 г. предложил использовать плавящийся электрод с покрытием, способствующим стабилизации горения дуги и улучшению качества сварного шва. Разработанные О. Кьельбергом составы покрытий позволили сократить попадание азота и кислорода в сталь, устранить проблему хрупкости, пористости и неоднородности сварного шва.

Большой вклад в развитие теоретических и практических основ сварки внесли советские ученые Е. О. Патон (1870–1953) и В. П. Вологдин (1881–1953), которые в 1920–30 гг. явились организаторами широкого применения сварки в машиностроении, судостроении, строительстве и др.

Сварка широко используется в современном машиностроении, электронике, строительстве. Применение сварки при создании различных конструкций позволяет более эффективно использовать прокат, поковки и отливки, на изготовление которых расходуется около половины всей выплавляемой стали.

**Сварка** — это процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании и (или) пластическом деформировании (ГОСТ 2601-84).

Для создания межатомных связей необходимо сближение атомов контактирующих поверхностей на расстояние, соизмеримое с параметрами кристаллической решетки, т. е. на межатомное расстояние. Если такое сближение происходит, возникшие силы межатомного или межмолекулярного взаимодействия обеспечивают образование устойчивых межатомных связей, и, следовательно, прочного неразъемного соединения. Однако, в реальных условиях сближению атомов на расстояния межатомных взаимодействий препятствует наличие на соединяемых поверхностях микронеровностей (шероховатости), оксидных, масляных и других загрязнений. Эти негативные факторы можно устранить нагревом зоны контакта до расплавления или ее пластическим деформированием. В результате плавления этой зоны микронеровности расплавляются, а загрязнения всплывают наверх расплава. При пластическом деформировании зоны контакта микронеровности сглаживаются и исчезают, а присутствующие на ее поверхности загрязнения разрушаются и вытесняются из зоны контакта.

Рассмотренные способы воздействия на зону контакта для установления межатомных связей позволяют разделить существующие виды сварки на **две группы**: сварку плавлением и сварку давлением.

**Сварка плавлением** — сварка, осуществляемая плавлением кромок свариваемых деталей без приложения давления. В результате оплавления кромок соединяемых деталей между ними образуется общая жидкая ванна из расплавленного металла. При дальнейшем ее охлаждении и кристаллизации создаются прочные атомно-молекулярные связи, и происходит соединение деталей в единое целое.

**Сварка давлением** — сварка, осуществляемая за счет пластической деформации контактирующих поверхностей соединяемых деталей при температуре, как правило, ниже температуры плавления. При приложении нагрузки происходит пластическое течение металла в зоне контакта, приводящее к смятию микронеровностей и изменению рельефа поверхностей, разрушению и вытеснению загрязнений из зоны контакта. В результате этого происходит сближение со-

единяемых поверхностей на межатомное расстояние и образование прочных атомно-молекулярных связей. Пластическое деформирование металла в твердом состоянии требует значительных усилий, поэтому для их уменьшения применяют подогрев зоны контакта, приводящий к повышению пластичности металла в десятки раз.

*Особенности применения сварки плавлением и давлением.* Различия в механизмах установления межатомных связей при сварке способами плавления и давления обуславливают возможности их практического использования при изготовлении тех или иных конструкций деталей, узлов и изделий.

Так, методы сварки плавлением (в отличие от сварки давлением) позволяют:

- 1) производить сварку в монтажных, цеховых и полевых условиях (ручная дуговая и газовая сварка);
- 2) осуществлять сварку металлических заготовок толщиной от нескольких микрометров (микроплазменная сварка) до 1 м и более (электрошлаковая сварка);
- 3) сваривать конструкции различных габаритных размеров практически неограниченной длины, например, магистральные газо- и нефтепроводы (дуговые методы сварки);
- 4) изменять химический состав металла шва, применяя сварочную проволоку и присадочный материал различного химического состава, вводя легирующие элементы в электродное покрытие и флюсы (дуговые методы сварки, газовая сварка);
- 5) осуществлять сварку в любых пространственных положениях, а также в космосе и под водой (дуговые методы сварки).

В свою очередь, методы сварки давлением (в отличие от сварки плавлением), позволяют:

- 1) расширить диапазон свариваемых материалов, в том числе разнородных металлов (медь – титан, коррозионно-стойкая сталь – углеродистая сталь, твердый сплав – углеродистая сталь и др.), а также неметаллических материалов (керамика – керамика, керамика – металл, полимер – металл) (сварка взрывом, ультразвуковая, диффузионная);
- 2) механизировать и автоматизировать процессы сварки и, тем самым, повысить производительность получения сварных соединений (контактные способы сварки, ультразвуковая, холодная, индукционная);

3) уменьшить вероятность возникновения трещин, пористости, появления хрупких интерметаллических и шлаковых включений и, тем самым, повысить качество сварных соединений.

Помимо разделения видов сварки на группы по способам установления межатомных связей, ее также классифицируют по физическим, техническим и технологическим признакам.

*По физическим признакам*, характеризуемым формой вводимой энергии, обеспечивающей (или не обеспечивающей) расплавление соединяемых поверхностей, и отсутствием (или наличием) давления, все виды сварки подразделяют на **три класса**: термический, термомеханический, механический.

К *термическому классу* относятся виды сварки, осуществляемые с использованием только тепловой энергии, приводящей к расплавлению соединяемых поверхностей, и отсутствием давления (дуговая сварка, электрошлаковая, плазменная, электронно-лучевая, газовая, термитная, лазерная и др.). Термический класс соответствует группе способов сварки плавлением.

К *термомеханическому классу* относятся виды сварки, осуществляемые с использованием тепловой энергии и давления, причем вводимая тепловая энергия, как правило, не приводит к расплавлению зоны соединения (контактная сварка, газопрессовая, диффузионная, индукционная и др.).

К *механическому классу* относятся виды сварки, осуществляемые с использованием механической энергии и давления (сварка трением, взрывом, холодная сварка, ультразвуковая, магнитно-импульсная и др.).

Термомеханический и механический классы соответствуют группе способов сварки давлением.

К *техническим признакам*, характеризующим сварку, относятся следующие: способ защиты металла в зоне сварки, непрерывность процесса и степень его механизации.

*По способу защиты* металла в зоне сварки различают сварку в воздушной среде, в защитном газе, под флюсом и др.

*По непрерывности* процесса сварку разделяют на непрерывную и прерывистую.

*По степени механизации* процесса сварка бывает:

1) ручная — сварка, выполняемая человеком с помощью инструмента, получающего энергию от специального источника;

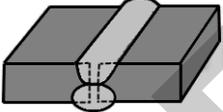
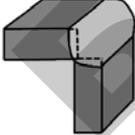
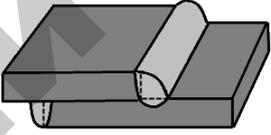
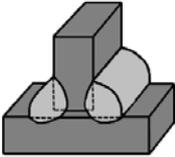
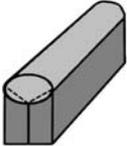
2) механизированная — сварка, выполняемая с применением машин и механизмов, управляемых человеком;

3) автоматическая — сварка, выполняемая машиной, действующей (без непосредственного участия человека) по заданной программе.

**Сварным соединением** называют участок конструкции, в котором отдельные ее элементы соединены с помощью сварки.

По форме сопряжения свариваемых элементов различают следующие типы сварных соединений: стыковые, тавровые, угловые, нахлесточные и торцовые (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Типы сварных соединений (ГОСТ 2601-84)	
Тип соединения (определение)	Схема соединения
Стыковое соединение — сварное соединение двух элементов, примыкающих друг к другу торцовыми поверхностями	
Угловое соединение — сварное соединение двух элементов, расположенных под углом и сваренных в месте примыкания их краев	
Нахлесточное соединение — сварное соединение, в котором сваренные элементы расположены параллельно друг другу и частично перекрывают друг друга	
Тавровое соединение — сварное соединение, в котором торец одного элемента примыкает под углом к боковой поверхности другого элемента и приварен к ней	
Торцовое соединение — сварное соединение, в котором боковые поверхности сваренных элементов примыкают друг к другу	

Следует отметить, что в сварном соединении присутствуют совокупности зон, образующихся в материале в процессе сварки. Зоны могут отличаться между собой и от основных материалов по химическому составу, структуре, а также физическим, механическим и другим свойствам.

В сварном соединении, выполненном сваркой плавлением, присутствуют следующие зоны: сварной шов, зона термического влияния и зона прилегающего основного материала, сохраняющего присущие ему свойства и структуру (рис. 3.1, а).

Сварное соединение, выполненное сваркой давлением, состоит из зоны сварного шва, зоны механического влияния и зоны основного металла (рис. 3.1, б).

В сварном шве при сварке плавлением материал представляет собой сплав, образованный переплавленными основными и дополнительными (электродным и присадочным) материалами или только основными материалами. В зоне термического влияния основной материал не расплавляется, но на отдельных участках зоны под действием нагрева и охлаждения изменяются его свойства и структура.

**Сварной шов** — участок сварного соединения, образовавшийся в результате плавления и последующей кристаллизации расплавленного металла (при сварке плавлением) или в результате пластической деформации и последующей диффузии (при сварке давлением). Сварной шов является связующей частью соединяемых элементов, определяет геометрическую форму, сплошность, прочность и другие свойства металла непосредственно в месте сварки.

Сварные швы подразделяются по форме поперечного сечения шва, по протяженности, по способу выполнения, по пространственному положению, по положению относительно действующего усилия и по форме подготовки кромок.

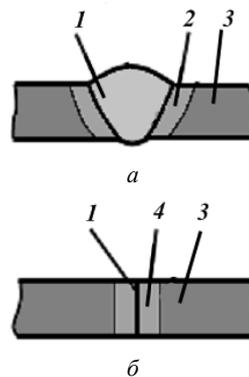


Рис. 3.1. Сварное соединение, выполненное сваркой плавлением (а) и сваркой давлением (б): 1 — сварной шов; 2 — зона термического влияния; 3 — зона основного материала; 4 — зона механического влияния

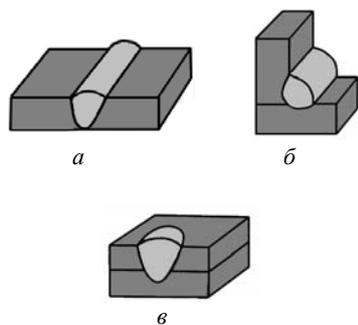


Рис. 3.2. Классификация сварных швов по форме поперечного сечения: *a* — стыковой; *б* — угловой; *в* — точечный (прорезной)

По форме поперечного сечения сварные швы подразделяют на стыковые, угловые и точечные (рис. 3.2). **Стыковой** шов — сварной шов стыкового соединения (рис. 3.2, *a*). **Угловой** шов — сварной шов углового, нахлесточного или таврового соединений (рис. 3.2, *б*). **Точечный (прорезной)** шов — сварной шов нахлесточного соединения, в котором связь между сваренными частями осуществляется сварными точками (рис. 3.2, *в*).

По протяженности сварные швы подразделяют на непрерывные и прерывистые. **Непрерывный** шов — сварной шов без промежутков по длине. **Прерывистый** шов — сварной шов с промежутками по длине. Стыковые сварные швы, как правило, выполняют непрерывными. Угловые и тавровые швы могут быть непрерывными и прерывистыми.

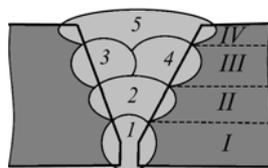


Рис. 3.3. Многослойный шов

По способу выполнения сварка бывает: **односторонняя** и **двусторонняя**, а также **однослойная** и **многослойная**. **Многослойный шов** применяют при сварке изделий большой толщины, а также для уменьшения зоны термического влияния. Под **слоем сварного шва**

(*I...IV*) понимают часть металла сварного шва, которая состоит из одного или нескольких валиков (*1...5*), располагающихся на одном уровне поперечного сечения шва (рис. 3.3). **Валик** — металл сварного шва, наплавленный за один проход. Под **проходом** при сварке подразумевается однократное перемещение в одном направлении источника тепла.

По пространственному положению (с учетом международных стандартов) различают следующие сварные швы: **горизонтальные** и **вертикальные** (на вертикальной плоскости), **потолочные** и **нижние** (рис. 3.4).

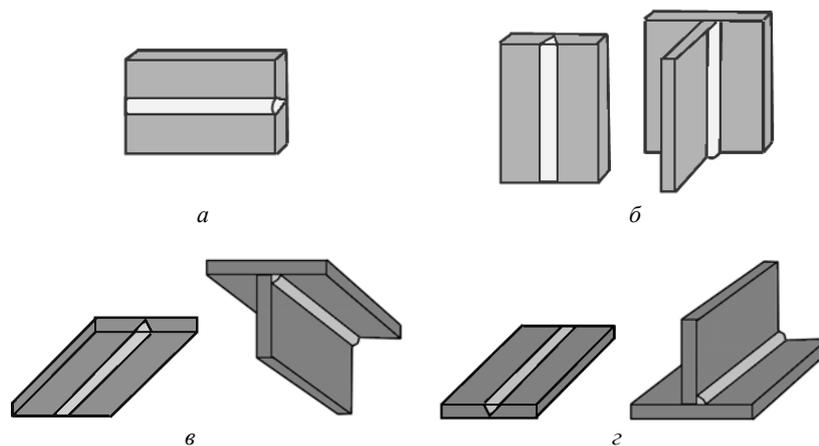


Рис. 3.4. Положение шва при сварке стыковых и тавровых соединений листов: *a* — горизонтальное; *б* — вертикальное; *в* — потолочное; *г* — нижнее

По положению относительно действующего усилия швы могут быть лобовыми, фланговыми, косыми и комбинированными (рис. 3.5). Лобовой шов расположен перпендикулярно усилию (рис. 3.5, *a*), фланговый — параллельно (рис. 3.5, *б*), косой — под углом (рис. 3.5, *в*). Эти определения относятся к угловым швам нахлесточных соединений.

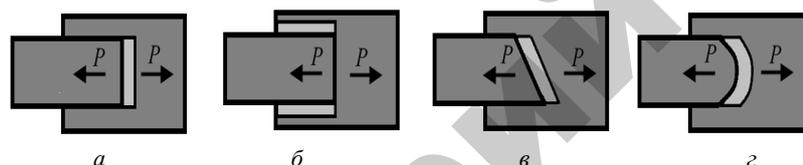


Рис. 3.5. Расположение швов относительно действующего усилия: *a* — лобовой; *б* — фланговый; *в* — косой; *г* — комбинированный

Конструктивные элементы *подготовки кромок* изделия регламентируются ГОСТ 5264-80 (для ручной дуговой сварки) и ГОСТ 8713-70 (для автоматической сварки под слоем флюса). Вид подготовки кромок зависит от толщины свариваемых деталей, способа сварки, а также технологических и конструктивных особенностей свариваемого изделия.

## 1.2. Зона термического влияния и свариваемость металлов

**Зона термического влияния** — прилегающий к сварному шву участок основного металла, в котором в результате термического воздействия произошли изменения структуры и свойств.

Температура нагрева различных участков зоны термического влияния находится в пределах от температуры плавления (вблизи шва) до начальной температуры основного металла. Строение и размеры зоны термического влияния зависят от химического состава и теплофизических характеристик свариваемого металла, а так же от температурного режима (термического цикла) сварки.

Рассмотрим строение зоны термического влияния на примере малоуглеродистой стали. В соответствии с диаграммой состояния Fe–Fe<sub>3</sub>C зона термического влияния состоит из шести характерных участков (рис. 3.6).

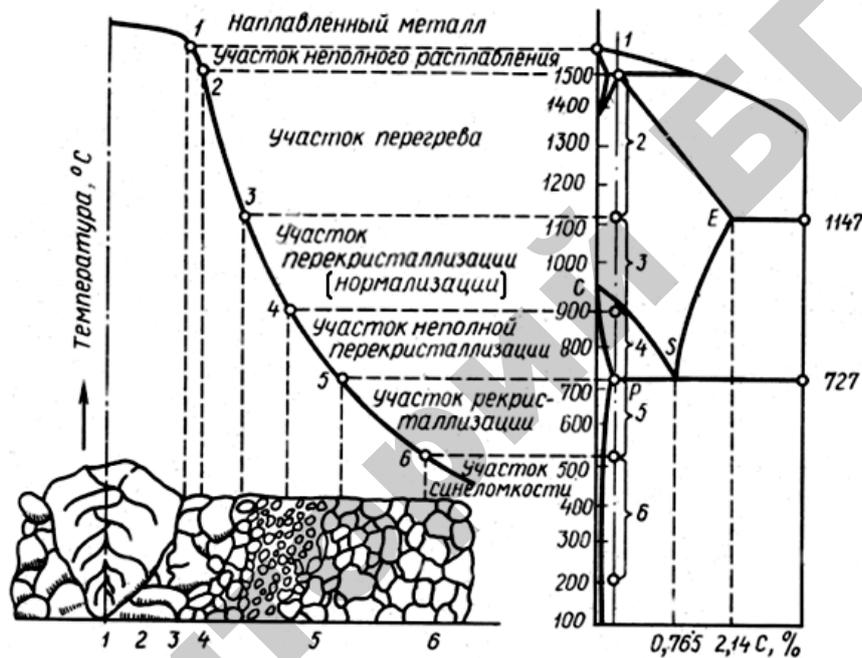


Рис. 3.6. Изменение микроструктуры металла в зоне термического влияния при сварке низкоуглеродистой стали

Первый участок (*участок неполного расплавления*) непосредственно примыкает к металлу шва (*наплавленному металлу*). Этот участок формируется из двухфазного (жидкость – твердое тело) состояния и, подобно наплавленному металлу, имеет дендритное строение. Именно здесь и происходит сварка. Участок имеет небольшую ширину и по химическому составу и структуре отличается от соседнего участка 2 основного металла.

Совокупность первого участка околошовной зоны и пограничного участка металла шва называют *зоной сплавления* или *переходной зоной*. Свойства этой зоны в ряде случаев оказывают решающее влияние на работоспособность сварных конструкций, т. к. при динамических нагрузках здесь чаще всего образуются трещины.

Второй участок околошовной зоны, получивший название *участка перегрева 2* (участок крупного зерна), включает металл, нагретый от температуры  $\sim 1\ 200\ ^\circ\text{C}$  до температуры плавления. Металл на этом участке претерпевает полиморфное превращение  $\alpha\text{-Fe} - \gamma\text{-Fe}$ . При значительном перегреве относительно точки  $A_{c3}$  происходит рост аустенитного зерна. Обычно металл на втором участке околошовной зоны обладает худшими свойствами, чем основной металл. Задача выбора рациональной технологии сварки сводится, в первую очередь, к обеспечению наименьшего ухудшения свойств металла на этом участке.

Третий участок околошовной зоны получил название *участка перекристаллизации (нормализации)*. Он включает металл, приобретший в процессе нагрева выше  $A_{c3}$  полностью аустенитную структуру, а при умеренном охлаждении – мелкокристаллическое строение. Этот участок обладает хорошими механическими свойствами.

Четвертый участок околошовной зоны, получивший название *участка неполной перекристаллизации*, включает металл, нагретый от температуры, при которой начинается превращение  $\alpha\text{-Fe} - \gamma\text{-Fe}$  ( $727\ ^\circ\text{C}$ ), до температуры  $\sim 880\ ^\circ\text{C}$  (между точками  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$ ). Металл на этом участке подвергается только частичной перекристаллизации. Поэтому здесь наряду с зернами основного металла, не изменившимися в процессе сварки (феррит), присутствуют зерна, образовавшиеся при перекристаллизации (перлит).

На пятом участке основной зоны, именуемом *участком рекристаллизации*, металл нагревается до  $727\ ^\circ\text{C}$ . Здесь происходит пе-

рекристаллизация раздробленных при пластическом деформировании зерен основного металла и некоторое разупрочнение его по сравнению с исходным состоянием. Структура этой зоны мало отличается от структуры основного металла.

Кроме того, в зону термического влияния входит *участок синеломкости* б. При температуре 200...500 °С происходит процесс старения — закрепление атомами внедрения дислокаций, вызывающих уменьшение их подвижности и повышение хрупкости.

В случае многопроходных швов околошовная зона располагается не только в основном металле, но и в металле шва. При этом ее строение в пределах шва значительно отличается от строения в основном металле. Как правило, в пределах первых трех участков наблюдается образование мелкозернистых структур, обладающих повышенной пластичностью. При этом зона крупного зерна отсутствует.

В зоне термического влияния и на ее границе с участком основного металла с неизменной структурой и свойствами возникают внутренние напряжения, приводящие к возникновению холодных и горячих трещин, пластической деформации сварного соединения, окислению, образованию пор и других дефектов. Эти изменения являются основными общими критериями свариваемости материалов.

**Свариваемость** — это технологическое свойство, характеризующее способность металлов и сплавов образовывать надежные в эксплуатации сварные соединения. Металлы и сплавы обладают различной способностью к свариваемости. Свариваемость металлов зависит от их природы и особенностей применяемого метода сварки.

Свариваемость — сложное, комплексное свойство материалов. Его нельзя определить с помощью одного испытания или по одной методике. Оценка свариваемости непосредственно связана с характеристикой материала и условиями его эксплуатации. Однако некоторые критерии оценки свариваемости являются достаточно общими для многих металлов и сплавов. Наилучшей свариваемостью обладают металлы с хорошей взаимной растворимостью, высокой теплопроводностью, незначительным коэффициентом линейного и объемного расширения и малой усадкой.

Количественным показателем свариваемости стали, которая является основным материалом для получения сварных конструкций, служит

эквивалентное содержание углерода  $C_3$ . Оно равно количеству углерода и легирующих элементов в стали и определяется по формуле

$$C_3 = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} + \frac{Si}{24} (\%).$$

В зависимости от эквивалентного содержания углерода (и связанной с этим склонностью к закалке и образованию трещин) стали по свариваемости делят на четыре группы.

К группе 1 (хорошая свариваемость,  $C_3 < 0,25 \%$ ) относятся стали, сварка которых может быть выполнена без их подогрева (до сварки и в процессе сварки) и без последующей термообработки. При этом для снятия внутренних напряжений не исключается применение термообработки.

К группе 2 (удовлетворительная свариваемость,  $C_3 = 0,25...0,35 \%$ ) относятся преимущественно стали, при сварке которых в нормальных производственных условиях трещины не образуются, а также стали, которые для предотвращения трещин нуждаются в предварительном подогреве и последующей термообработке.

К группе 3 (ограниченная свариваемость,  $C_3 = 0,36...0,45 \%$ ) относятся стали, склонные к образованию трещин в обычных условиях сварки. Их предварительно подвергают термообработке и подогревают. Большинство сталей этой группы термически обрабатывают и после сварки.

К группе 4 (плохая свариваемость,  $C_3 > 0,45 \%$ ) относятся стали, наиболее трудно сваривающиеся и склонные к образованию трещин. Их обязательно подвергают предварительной термообработке, подогревают в процессе сварки и осуществляют последующую термообработку.

Свариваемость основных марок сталей представлена в таблице 3.2.

*Чугун* относится к категории плохо свариваемых сплавов. Детали из чугуна сваривают при ремонте деталей и исправлении дефектов в отливках. При сварке чугунных изделий металл шва получает структуру белого чугуна, а зона термического влияния закаливается. Это затрудняет механическую обработку сварных соединений и может привести к образованию трещин. Поэтому сварку чугунных изделий выполняют с предварительным подогревом свариваемых деталей до температуры 400...700 °С.

Таблица 3.2

## Классификация сталей по свариваемости

Группа	Свариваемость	Сталь	
		углеродистая	легированная
1	Хорошая	Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, 08, 10, 20, 12кп, 16кп, 20кп	15Г, 20Г, 15ХМ, 10ХСНД, 10ХГСНД, 15ХГСНД
2	Удовлетворительная	Ст5, сталь 30, 35	12ХН2, 14Х2МР, 20ХН, 20ХГСА, 25ХГСА, 30ХМ
3	Ограниченная	Ст6, сталь 40, 45, 50	35Г, 40Г, 45Х, 30ХГСА, 40ХМФА, 30ХГСМ
4	Плохая	Сталь 65, 70, 80, У7, У8, У9, У10	50Г, 8ХЗ, 45ХНЗМФА, 5ХНТ

Трудности, возникающие при сварке *медных* изделий, связаны с высокой теплопроводностью меди и ее пониженной стойкостью к порообразованию в швах. Высокая теплопроводность меди (в 6 раз больше, чем у стали) требует более концентрированного нагрева (значительная величина теплового расширения меди приводит к существенным тепловым деформациям и напряжениям). Поэтому при сварке меди часто возникает необходимость в предварительном и сопутствующем подогреве основного металла.

Проблемами, возникающими при сварке изделий из *латуни*, являются значительная потеря цинка (вследствие его испарения) и поглощение газов жидким металлом. Испарение цинка связано с низкой температурой его кипения. Чтобы уменьшить теплоотвод от сварочной ванны и создать условия для более полного удаления из нее растворившихся газов, целесообразно нагревать основной металл перед сваркой до температуры 250...300 °С.

Свариваемость *бронзовых* изделий в значительной степени зависит от состава бронз. Особые трудности вызывает сварка изделий из литейных оловянных бронз. Их предварительно нагревают (но не перегревают, поскольку избыточное олово, оставшееся на границах зерен, при перегреве легко расплавляется и снижает проч-

ность наплавленного металла). В этой связи сварку изделий из литейных оловянных бронз производят, чаще всего, газовой сваркой (нормальным ацетиленокислородным пламенем с замедленным охлаждением металла).

Трудности при сварке изделий из *алюминиевых* и *магниевых* сплавов обусловлены образованием тонких прочных и тугоплавких оксидных пленок, которые имеют более высокую температуру плавления и большую удельную плотность, чем основной металл. Так, температура плавления  $Al_2O_3$ , равна 2 323 К, а  $MgO$  — 3 073 К. Это приводит к тому, что при сварке деталей пленки оксидов препятствуют сплавлению кромок. Для осуществления процесса сварки нужного качества необходимо удалять оксиды с поверхности кромок (механическая зачистка, специальное травление) до и в процессе сварки.

Наиболее часто применяется сварка деталей из сплавов алюминия и магния в среде инертных газов (аргон, гелий) вольфрамовым или плавящимся электродом. Оксидная пленка в этом случае разрушается под воздействием ударов положительно заряженных ионов аргона или гелия. В ряде случаев для соединения деталей из этих сплавов используют и другие виды сварки (электронно-лучевую, холодную, а также ультразвук, взрывом и трением).

### 1.3. Дуговые методы сварки

Следует отметить, что по своей простоте и универсальности ни один вид сварки пока еще не может конкурировать с дуговой сваркой (на нее приходится более 60 % всего объема сварочных работ).

**Дуговая сварка** — сварка плавлением, при которой нагрев осуществляется электрической дугой.

Источник теплоты при дуговой сварке — *электрическая (сварочная) дуга*, которая горит между электродами и заготовкой. В зависимости от материала электродов и их числа, а также способа включения электродов и заготовки в цепь электрического тока различают следующие виды дуговой сварки:

1) *сварка неплавящимся* (угольным, графитовым или вольфрамовым) *электродом 1* дугой прямого действия 2, при которой соединение выполняется путем расплавления только основного металла 3 либо с применением присадочного металла 4 (рис. 3.7, а);

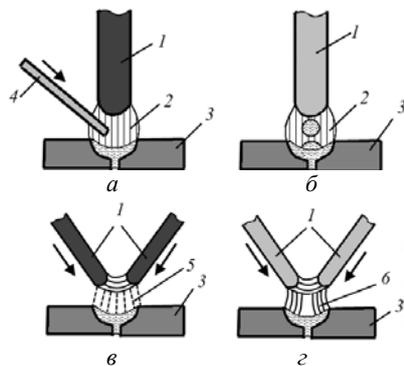


Рис. 3.7. Виды дуговой сварки:  
 а — сварка неплавящимся электродом;  
 б — сварка плавящимся электродом;  
 в — сварка дугой косвенного действия;  
 г — сварка трехфазной дугой

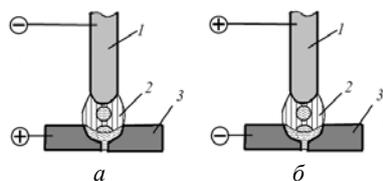


Рис. 3.8. Дуговая сварка: а — дугой прямой полярности; б — дугой обратной полярности

подключают к отрицательному полюсу (катоде), а свариваемое изделие — к положительному (аноду). При обратной полярности (рис. 3.8, б) электрод подключают к положительному полюсу (аноду), а свариваемое изделие — к отрицательному (катоде). При питании дуги переменным током ее полярность постоянно меняется.

**Сварочная дуга и ее свойства.** *Сварочной дугой* называют мощный устойчивый электрический разряд между электродами, находящийся в среде ионизированных газов и паров. Процесс зажигания дуги между электродами, одним из которых является свариваемое изделие, чаще всего осуществляют коротким замыканием электрода на изделие, для чего сварщик на мгновение прикасается электродом к изделию (рис. 3.9, а), а затем размыканием этой электрической цепи (сварщик отводит электрод на 3...6 мм от изделия) (рис. 3.9, б).

2) *сварка плавящимся* (металлическим) электродом 1 дугой прямого действия 2 с одновременным расплавлением основного металла 3 и электрода, который пополняет сварочную ванну жидким металлом (рис. 3.7, б);

3) *сварка косвенной дугой* 5, горячей между двумя, как правило, неплавящимися электродами 1; при этом основной металл 3 нагревается и расплавляется теплотой столба дуги (рис. 3.7, в);

4) *сварка трехфазной дугой* б, при которой дуга горит между двумя электродами 1, а также между каждым электродом и основным металлом 3 (рис. 3.7, г).

Питание дуги осуществляется постоянным или переменным током. При применении постоянного тока различают сварку дугой *прямой полярности* и *дугой обратной полярности*. При прямой полярности (рис. 3.8, а) электрод

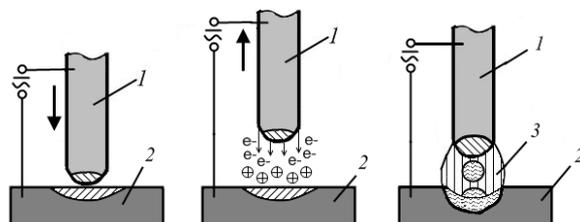


Рис. 3.9. Схема процесса зажигания дуги

При коротком замыкании контактирующие микровыступы на изделии и электроде нагреваются до температуры кипения, обеспечивая испускание электронов (*термоэлектронная эмиссия*). В момент размыкания между электродом и изделием возникает электрическое поле большой напряженности, величина которого достигает  $1,5 \cdot 10^{12}$  В/см. Это поле обеспечивает еще более мощное испускание электронов (*автоэлектронная эмиссия*). В межэлектродном промежутке электроны и ионы на своем пути многократно сталкиваются с молекулами газа, ионизируя их, в результате чего поток носителей электрических зарядов лавинообразно возрастает — происходит ионизация сварочного промежутка. Электроны и отрицательные ионы бомбардируют поверхность анода, а положительные ионы бомбардируют поверхность катода. При этом кинетическая энергия носителей тока преобразуется главным образом в тепловую энергию. Поверхности электродов нагреваются и примерно через  $10^{-6}$  с между ними зажигается сварочная дуга (рис. 3.9, в).

Зажигание сварочной дуги может происходить без короткого замыкания и отвода электрода. Для этого в сварочную цепь на короткое время подключают источник высокочастотного переменного тока высокого напряжения (осциллятор), который с помощью высокочастотного электрического разряда обеспечивает первоначальную ионизацию промежутка между электродом и изделием. Этот способ применяется для зажигания дуги при сварке неплавящимся электродом.

В установившейся сварочной дуге (рис. 3.10) различают три зоны: катодную, анодную и столб дуги. **Катодная зона**, так называемое *катодное пятно*, расположена на торце катода (при сварке дугой прямой полярности — на электроде, обратной полярности — на изделии). Из этой области вылетает поток свободных электро-

нов, ионизирующих дуговой промежуток. К катоду устремляются потоки положительных ионов, которые бомбардируют его, отдавая свою энергию, и нагревают катод до температуры 2 500...3 000 °С.

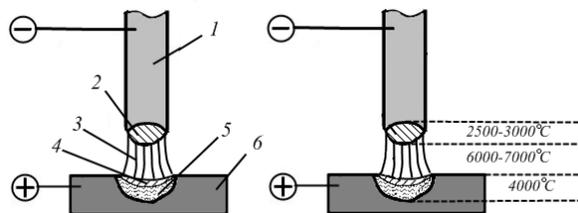


Рис. 3.10. Строение сварочной дуги: 1 — электрод; 2 — катодное пятно; 3 — столб дуги; 4 — анодное пятно; 5 — сварочная ванна; 6 — свариваемый металл

**Анодная зона**, называемая *анодным пятном*, расположена на торце анода (при сварке дугой прямой полярности — на изделии, обратной полярности — на электроде). К анодному пятну устремляются и отдают ему свою энергию потоки электронов, накаляя его до температуры 2 500...4 000 °С. В анодной области дуги, как правило, выделяется больше тепловой энергии, чем в катодной.

**Столб дуги** расположен между катодной и анодной зонами. В зависимости от плотности сварочного тока температура в этой зоне составляет 6 000...7 000 °С.

При питании дуги постоянным током около 42...43 % теплоты выделяется на аноде, 36...38 % — на катоде и 20...21 % — в столбе дуги. Поэтому температура анода всегда выше температуры катода.

При сварке дугой переменного тока температуры анода и катода выравниваются вследствие периодической смены полярности, а количество выделяемой теплоты распределяется следующим образом: половина (50 %) идет на нагрев изделия, около 30 % — на нагрев электрода и почти 20 % — на нагрев окружающей среды (потери тепла).

Электрические свойства сварочной дуги описываются *статической вольтамперной характеристикой* — зависимостью между напряжением и током сварочной дуги при устойчивом ее горении (рис. 3.11). Она состоит из трех участков: *I* — падающего, *II* — жесткого, *III* — возрастающего. На участке *I* с повышением силы тока увеличивается степень ионизации дуги, и напряжение для ее поддержания

уменьшается. На участке *II* пропорционально силе тока возрастает сечение дуги, при этом плотность тока и напряжение дуги остаются постоянными. На участке *III* при повышении тока рост сечения дуги ограничивается сечением электрода, в результате чего увеличиваются сила тока и напряжение дуги.

Каждому участку статической вольт-амперной характеристики дуги соответствует определенный характер переноса расплавленного электродного металла в сварочную ванну: на *I* и *II* участках — крупнокапельный, на *III* — мелкокапельный или струйный.

На участке *I* дуга малоустойчива, поскольку незначительное изменение величины тока приводит к значительному изменению напряжения и к обрыву дуги (дуга гаснет). Такая дуга имеет ограниченное применение. Поэтому большее применение имеет дуга на жестком *II* и возрастающем *III* участках.

**Источники питания электрической дуги.** Источники тока для питания сварочной дуги должны иметь специальную внешнюю вольт-амперную характеристику. *Внешней вольт-амперной характеристикой* источника тока называется зависимость напряжения на его выходных клеммах от силы тока в электрической цепи. Внешние характеристики могут быть следующими (рис. 3.12): падающая *1*, пологопадающая *2*, жесткая *3*, возрастающая *4*.

Режимы горения дуги определяются точками пересечения характеристик дуги *1* и источника тока *2* (рис. 3.13). Точка *A* соответствует режиму холостого хода в работе источника тока в период, когда

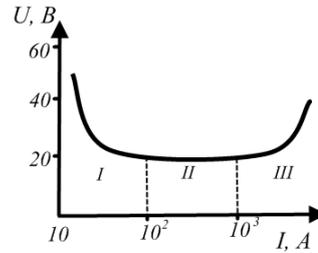


Рис. 3.11. Статическая вольт-амперная характеристика

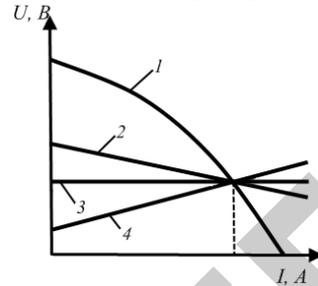


Рис. 3.12. Внешние вольт-амперные характеристики источников тока

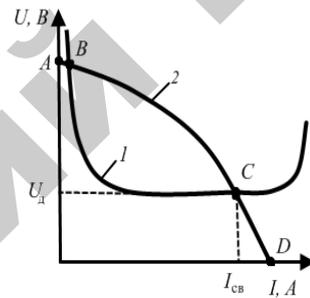


Рис. 3.13. Совмещенная вольт-амперная характеристика дуги и источника тока

дуга не горит и сварочная цепь разомкнута. Точка *B* называется точкой зажигания и неустойчивого горения дуги. Точка *C* соответствует режиму устойчивого горения дуги. Точка *D* соответствует режиму короткого замыкания при зажигании дуги (в момент касания электродом изделия) и ее замыкании каплями жидкого электродного металла. Короткое замыкание характеризуется малым напряжением, стремящимся к нулю, и повышенным, но ограниченным током.

Для питания дуги на жестком участке *II* (рис. 3.11) применяют источники с падающей или пологопадающей характеристикой, а на возрастающем участке *III* (рис. 3.11) — источники с любой внешней характеристикой, в том числе жесткой или возрастающей.

Источники сварочного тока с падающей характеристикой обладают рядом преимуществ. При использовании таких источников за счет повышенного напряжения холостого хода легче осуществляется зажигание дуги, обеспечивается устойчивое ее горение и постоянная проплавливающая способность, а также ограничивается величина тока короткого замыкания, чем гарантируется отсутствие перегрева токопроводящих проводов и источников тока.

Источники питания электрической дуги при работе на установившихся режимах характеризуются следующими параметрами: номинальным током, пределами регулирования сварочного тока, напряжением холостого хода, номинальным рабочим напряжением, продолжительностью работы, коэффициентом полезного действия.

*Номинальный ток* определяет расчетное значение сварочного тока источника. Для большинства источников питания дуги значения номинальных токов находятся в пределах 50...1 000 А.

*Пределы регулирования сварочного тока* указывают минимальные и максимальные значения тока, которые могут быть использованы при сварке. В большинстве случаев за максимальный ток принимают номинальный ток. Отношение максимального тока к минимальному показывает кратность регулирования, которая обычно составляет не менее трех.

*Напряжение холостого хода* в значительной мере определяет условия зажигания и повторного возбуждения дуги. В зависимости от назначения источника питания напряжение холостого хода может изменяться от 30 до 120 В.

*Номинальное рабочее напряжение* характеризует напряжение на зажимах источника питания под нагрузкой. Обычно оно равно

16...30 В. Для мощных источников питания при сварочном токе 600 А и более рабочее напряжение может составлять 44 В и выше.

*Коэффициент полезного действия*  $\eta$  характеризует потери энергии в самом источнике и определяется по формуле

$$\eta = \frac{N_d}{N_c} 100 (\%),$$

где  $N_d$  — мощность дуги;  $N_c$  — мощность, потребляемая из сети.

Для различных источников питания  $\eta$  составляет 45...98 %.

Источники питания дуги должны обеспечивать надежное зажигание дуги (начальное и повторные), ее горение и стабильный процесс сварки, качественное формирование сварного шва. Они должны способствовать благоприятному переносу электродного металла и его наименьшим потерям из-за разбрызгивания и угара.

Источники питания дуги в зависимости от рода тока подразделяются на источники переменного тока (сварочные трансформаторы) и постоянного тока (сварочные выпрямители и генераторы).

*Преимуществами* сварки с использованием источников постоянного тока являются следующие:

- 1) более устойчивое горение дуги (из-за отсутствия затуханий, связанных с изменением полярности при переменном токе);
- 2) высокое качество сварки, благодаря стабильности горения дуги постоянного тока;
- 3) улучшение условий сварки в различных пространственных положениях;
- 4) возможность выполнения сварки дугой как прямой полярности, так и обратной, когда, изменяя полярность дуги, можно регулировать соотношение нагрева электрода и изделия и, используя дугу обратной полярности, производить сварку изделий электродами с тугоплавкими покрытиями и флюсами.

*Сварочные трансформаторы* являются однофазными понижающими трансформаторами, преобразующими высокое напряжение электрической сети (220 или 380 В) в низкое напряжение сварочной цепи — напряжение холостого хода (60...80 В). Они имеют, в основном, крутопадающие и пологопадающие внешние вольтамперные характеристики и состоят из магнитопровода (сердечника),

первичной и вторичной обмоток, устройства, обеспечивающего регулирование тока. Падающая характеристика обеспечивается за счет индуктивного сопротивления в самом трансформаторе или включения в цепь дуги дополнительного индуктивного сопротивления — реактивной катушки.

Сварочные трансформаторы применяются для ручной дуговой сварки, автоматической сварки под флюсом, а также для аргодуговой сварки неплавящимся электродом. Их используют при изготовлении ответственных металлических конструкций из углеродистых сталей и некоторых цветных металлов и сплавов.

Сварочный трансформатор стоит в 2...4 раза дешевле сварочного выпрямителя и в 6...10 раз сварочного агрегата аналогичной мощности. Его КПД составляет 90 %, в то время как КПД сварочного выпрямителя — 70 %, а сварочного генератора — 45 %. Сварочные трансформаторы долговечны и надежны в работе, просты в эксплуатации и ремонте. Однако использование переменного тока промышленной частоты (50 Гц) приводит к неустойчивому горению электрической дуги, нестабильности режимов сварки, а также к необходимости использования специальных электродов для переменного тока.

**Сварочные выпрямители** состоят из трехфазного понижающего трансформатора, выпрямительного блока, измерительной и защитной аппаратуры. Внешняя вольтамперная характеристика сварочного выпрямителя определяется вольтамперной характеристикой трансформатора и может быть как крутопадающей, так и жесткой.

Сварочные выпрямители применяются для ручной дуговой сварки, сварки под флюсом, сварки в среде углекислого газа.

*Преимуществами* выпрямителей являются плавное дистанционное регулирование режимов сварки и их стабилизация при изменении напряжения в сети.

**Сварочные генераторы** являются сложными электромеханическими устройствами, состоящими из двигателя и генератора, объединенными на общей базе. В таком устройстве механическая энергия вращения вала двигателя преобразуется генератором в постоянный электрический ток, поддерживающий устойчивое горение сварочной дуги. Если функции двигателя выполняет электрический двигатель, то такое устройство называют *сварочным преобразователем*, а если двигатель внутреннего сгорания — *сварочным агрегатом*. Сварочные агрегаты используют в тех местах, где отсутст-

вует электричество (на новостройках, на монтажных работах в полевых условиях, при сварке газо- и нефтепроводов, при прокладке линий электропередач и т. п.).

В зависимости от назначения сварочные генераторы могут иметь падающую или жесткую внешнюю вольтамперную характеристику. Они применяются для ручной дуговой сварки плавящимися электродами, сварки под флюсом, сварки в защитных газах.

В настоящее время все шире применяются **инверторные сварочные источники питания**, выпуск которых составляет около 70 % от всего выпускаемого сварочного оборудования. Их особенность заключается в том, что переменное напряжение сети частотой 50 Гц с помощью управляемого транзисторного инвертора преобразуется в высокочастотное напряжение частотой 20...60 кГц. Инверторный источник питания обычно состоит из входного низкочастотного выпрямителя, инвертора, высокочастотного трансформатора, выходного высокочастотного выпрямителя, блока управления (рис. 3.14).

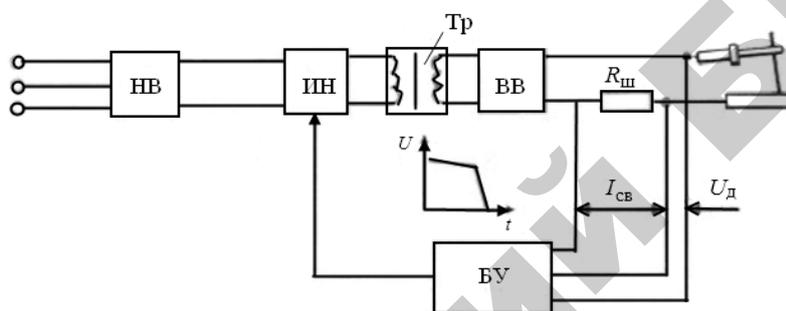


Рис. 3.14. Схема инверторного источника питания: НВ — низкочастотный выпрямитель; ИН — инвертор; Тр — высокочастотный трансформатор; ВВ — высокочастотный выпрямитель;  $R_{ш}$  — шунт; БУ — блок управления

Основными этапами преобразования тока в сварочном инверторном источнике являются следующие:

- 1) выпрямление переменного сетевого напряжения частотой 50 Гц (рис. 3.15, а) в низкочастотном выпрямителе (НВ) (рис. 3.15, б);
- 2) преобразование полученного выпрямленного напряжения с повышенными пульсациями в переменное напряжение высокой частоты с помощью инвертора (ИН) (рис. 3.15, в);

3) понижение переменного напряжения высокой частоты импульсным высокочастотным трансформатором (Тр) до значения, соответствующего напряжению сварки, с формированием необходимого вида вольтамперной характеристики (рис. 3.15, *з*);

4) преобразование высокочастотным выпрямителем (ВВ) переменного напряжения высокой частоты, имеющего величину сварочного напряжения, в постоянное напряжение со сглаживанием пульсаций тока (рис. 3.15, *д*).

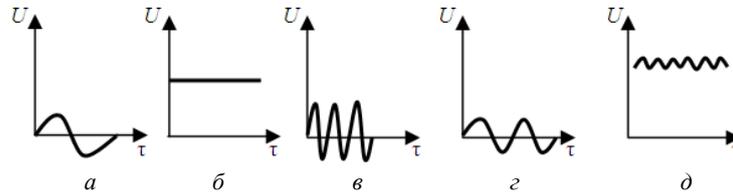


Рис. 3.15. Этапы преобразования тока в сварочном инверторном источнике

Универсальные инверторные сварочные выпрямители позволяют существенно снизить массу и габаритные размеры источника питания. Малая инерционность и высокие динамические свойства позволяют на основе инверторных выпрямителей реализовать перспективные схемы управления сварочными процессами, повышая их производительность и качество.

Инверторные выпрямители могут иметь любую форму внешней вольтамперной характеристики.

Инверторные источники питания применяются при механизированной сварке в углекислом газе и смесях газов, при ручной дуговой сварке и сварке неплавящимся электродом в инертных газах.

Особые технологические свойства имеют *импульсные инверторные источники сварочного тока*, разработанные на основе универсальных и инверторных выпрямителей. Специальные блоки управления работой тиристоров и транзисторов позволяют получать ток в виде импульсов различной формы (прямоугольных, экспоненциальных) с разными периодами и временем следования импульсов. Главное достоинство импульсных источников тока заключается в существенном снижении подвода тепла при сварке, что позволяет сваривать металл малой толщины без опасности прожога и недопустимого разбрызгивания металла электрода.

*Преимуществами* инверторных источников питания являются следующие:

- 1) высокий КПД (85...95 %);
- 2) небольшая масса (5...10 кг) и габаритные размеры (в 8...9 раз меньше, чем у сварочных трансформаторов), удобство переноски и доставки источника к месту сварки;
- 3) возможность плавного регулирования сварочного тока в значительно более широких пределах (от нескольких единиц до тысяч ампер);
- 4) отсутствие разбрызгивания электродов, что обеспечивает минимальный расход дефицитных электротехнических материалов;
- 5) возможность сварки короткой дугой, уменьшающей энергопотери и улучшающей качество сварного соединения (благодаря уменьшению зоны термического влияния, что позволяет соединять плохо свариваемые стали);
- 6) качественное формирование шва во всех пространственных положениях.

**Ручная дуговая сварка** — дуговая сварка, при которой возбуждение дуги, подача электрода и его перемещение проводятся вручную.

При сварке по методу Бенардоса применяют неплавящиеся электроды — угольные, графитовые или вольфрамовые (угольные и графитовые электроды используют только при сварке с использованием источников постоянного тока, а вольфрамовые — при сварке с использованием источников как постоянного, так и переменного тока).

Ручная дуговая сварка плавящимся электродом (сварка по Славянову) является самым распространенным способом сварки. Ее выполняют электродом, который представляет собой металлический стержень с нанесенным методом окунания или опрессовки покрытием определенного состава и толщины.

При сварке сталей металлический стержень электрода изготавливают из стальной проволоки следующих диаметров: 0,3; 0,5; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0 и 12 мм. Для ручной дуговой сварки используют электроды диаметром 1,6 мм и больше. Номинальная длина стержня электрода составляет от 150 до 450 мм. Сварочные электроды изготавливают из низкоуглеродистых, легированных и высоколегированных сталей и маркируют, добавляя впереди марки стали буквы Св (ГОСТ 2246-70). Так, электроды из низкоугле-

родистых сталей имеют марки Св-08, Св-08А, Св-08АА, Св-08ГА, Св-08ГА, Св-10ГА; из легированных — Св-08ГС, Св-12ГС, Св-08Г2С, Св-10ГН, Св-08ГСМТ, Св-18ХГС, Св-10НМА, Св-08ХМ, Св-18ХМА, Св-08ХМФА, Св-08ХГСМА, Св-06НЗ, Св-04Х2МА, Св-13Х2МФТ, Св-08ХМНФБА, Св-08ХН2Г2СМЮ и др.; из высоколегированных — Св-12Х11НМФ, Св-12Х13, Св-08Х14ГНТ, Св-01Х19Н9, Св-13Х25Т, Св-07Х18Н9ТЮ, Св-08Х19Н10М3Б, Св-30Х15Н35В3Б3Т, Св-13Х25Т, Св-10Х16Н25АМ6 и др.

Для сварки чугуновых изделий стержень электрода может быть изготовлен из чугуновых прутков со специальным покрытием, стальной сварочной проволоки (Св-08, Св-08А и др.), медной проволоки и ее сплавов (НМЖМц и др.), а также из некоторых проволок легированных сталей (Св-04Х19Н9, Св-04Х19Н9, Св-08Н50 и др.).

Покрытие на электроде представляет собой твердую оболочку в состав которой входят следующие составляющие:

1) стабилизирующие вещества, способствующие легкому зажиганию дуги и устойчивому ее горению. Для этого применяют вещества, содержащие щелочные и щелочноземельные металлы, которые снижают потенциал ионизации дугового столба и способствуют легкому зажиганию электрической дуги и устойчивому ее горению. К стабилизирующим составляющим относятся  $K_2CO_3$ ,  $KNO_3$ ,  $CaF_2$ ,  $CaCO_3$  и др.;

2) шлакообразующие вещества, обеспечивающие при горении дуги образование шлаков. Шлаки, во-первых, всплывая и растекаясь на поверхности сварочной ванны, защищают жидкий металл от вредного воздействия воздушной атмосферы. Во-вторых, при всплытии шлаки химически связывают оксиды металлов и выводят их на поверхность сварочной ванны, тем самым очищая (рафинируя) жидкий металл. В-третьих, находясь на поверхности, шлаки замедляют скорость охлаждения и процесс затвердевания жидкой ванны, способствуя выходу из нее газов и неметаллических включений. К шлакообразующим составляющим относятся оксиды  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $MnO$ ,  $CaO$ ,  $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$  и другие, вносимые в покрытие в виде минералов (кремнезема, мрамора) и руд (титановой, марганцевой);

3) легирующие вещества, попадающие из покрытия в жидкую ванну и обеспечивающие получение металла шва заданного химического состава с улучшенными физико-механическими свойствами

ми. К легирующим составляющим относятся ферросплавы (феррохром, ферромolibден, ферротитан, феррованадий и др.);

4) газообразующие вещества, являющиеся источником образования газов при сгорании (разложении). Эти газы обеспечивают защиту металла сварочной ванны от вредного воздействия воздушной атмосферы. К газообразующим составляющим относятся крахмал, целлюлоза, древесная мука и др.;

5) формующие вещества, предназначенные для придания покрытию пластических свойств, необходимых при его нанесении на электрод. К этим составляющим относятся различные глины (бентонит, каолин и др.);

6) связующие вещества, придающие необходимую прочность нанесенному покрытию. К этим составляющим относятся жидкое стекло (водный раствор силиката кальция или натрия) и др.

При ручной дуговой сварке плавящимся электродом (рис. 3.16) дуга 8 горит между стержнем электрода 7 и основным металлом 1, поверхность которого оплавляется. Стержень электрода плавится, и капли жидкого металла 9 стекают вниз. При этом вместе со стержнем плавится покрытие на электроде 6, образуя защитную газовую атмосферу 5 вокруг дуги и слой жидкого шлака 4 на поверхности ванны жидкого металла 10. По мере движения дуги расплавленный металл затвердевает, образуя сварной шов 3, а жидкий шлак 4 превращается в твердую корку 2 на его поверхности.

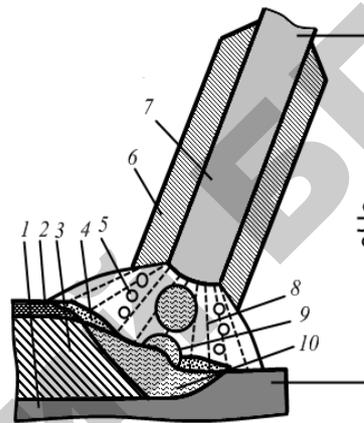


Рис. 3.16. Схема ручной дуговой сварки

Для получения сварного соединения требуемых размеров, формы и качества устанавливается режим сварки, т. е. основные показатели, определяющие ее процесс. К этим показателям при ручной дуговой сварке относятся марка электрода, его диаметр, сила и род применяемого тока, скорость сварки.

*Преимуществами* ручной дуговой сварки являются следующие:

1) возможность производить сварку в любом пространственном положении, что особенно важно при проведении монтажных работ;

- 2) простота применяемого оборудования;
- 3) возможность сварки в труднодоступных местах;
- 4) быстрый переход от сварки одного вида материала к другому;
- 5) большая номенклатура свариваемых металлов.

Главным *недостатком* ручной дуговой сварки является ее низкая производительность. Это обусловлено тем, что величина тока при ручной дуговой сварке электродом с покрытием ограничена, следовательно, ограничена скорость плавления электрода. Увеличение величины сварочного тока сверх рекомендуемых значений приводит к разогреву стержня электрода и разрушению на нем покрытия, а также сильному разбрызгиванию и угару расплавленного металла электрода.

Кроме того, *недостатками* ручной дуговой сварки являются вредные и тяжелые условия труда сварщика, а также трудность сварки материалов толщиной менее 1...2 мм.

Ручную дуговую сварку применяют при монтаже и сборке конструкций сложной формы, а также при производстве изделий, имеющих короткие и прерывистые швы, швы сложной конфигурации, т. е. там, где трудно или невыгодно применять автоматические методы сварки. Ручной дуговой сваркой можно сваривать сталь, чугун, медь и сплавы на основе меди.

В настоящее время ручную дуговую сварку постепенно заменяют автоматической сваркой под флюсом или механизированной сваркой в среде защитного газа.

**Дуговая сварка под флюсом** — дуговая сварка, при которой дуга горит под слоем сварочного флюса. Для дуговой сварки под флюсом используют непокрытую электродную проволоку и флюс.

При сварке стальных изделий в качестве электродной проволоки используют проволоки тех же марок, что и при ручной дуговой сварке.

*Сварочный флюс* — сыпучий измельченный многокомпонентный материал сложного химического состава. Компоненты этого материала выполняют стабилизирующую, шлакообразующую, легирующую и газообразующую функции (аналогично функциям, которые выполняют составляющие покрытия на электроде при ручной дуговой сварке). Основными компонентами флюса являются  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

По способу изготовления флюсы делятся на плавные и неплавные (керамические). Плавные флюсы получают в результате

сплавления соответствующих компонентов в электропечах и последующей грануляцией полученной стекловидной или пемзовидной массы на частицы размером 1...3 мм. Неплавленные (керамические) флюсы получают путем замеса на жидком стекле соответствующих компонентов (с последующим их прокаливанием) и грануляции.

При сварке под флюсом электрическая дуга *б* горит между электродной проволокой *2* и свариваемым металлом *1* (рис. 3.17). Проволока подается в зону сварки с помощью механизма подачи *3*, ток к электроду — через токопровод *4*. Электрическая дуга *б* и ванна жидкого металла *7* изолированы от окружающей среды слоем гранулированного флюса *5* толщиной 30...50 мм. Ванна состоит из металла расплавленных

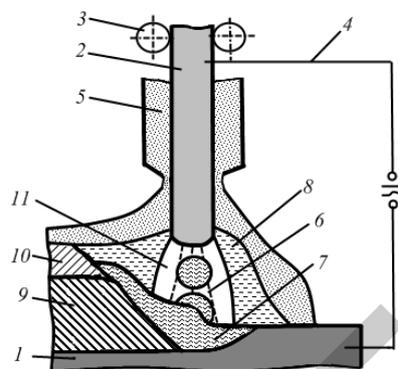


Рис. 3.17. Сварка под флюсом

кромки свариваемых элементов и электродной проволоки. Часть флюса в области электрической дуги и ванны жидкого металла расплавляется. В результате этого вокруг дуги образуется газовая полость *11*, а на поверхности расплавленного металла — ванна жидкого шлака *8*. Для сварки под флюсом характерно глубокое проплавление основного металла. Под действием электрической дуги при перемещении электрода вдоль заготовки происходит оттеснение расплавленного металла в сторону, противоположную направлению сварки. По мере поступательного движения электрода металлическая и шлаковая ванны затвердевают с образованием сварного шва *9*, покрытого твердой, легко удаляемой шлаковой коркой *10*. Нерасплавившийся флюс используется при сварке повторно.

При сварке под флюсом используются источники питания дуги переменного и постоянного тока с крутопадающей характеристикой, которая ограничивает величину тока короткого замыкания. Это ограничение необходимо, поскольку при сварке происходят короткие замыкания при касании электродной проволоки и изделия или переходе капли металла с электродной проволоки на изделие. Режимы сварки соответствуют жесткому участку

и началу возрастающего участка статической вольтамперной характеристики дуги (рис. 3.11).

По степени механизации процесса сварка под флюсом бывает автоматической и механизированной.

При автоматической сварке под флюсом автоматизированы все сварочные операции (зажигание электрической дуги, поддержание ее устойчивого горения, подача электрода и его перемещение вдоль свариваемых кромок, непрерывная подача флюса в зону горения дуги, прерывание процесса сварки).

При механизированной сварке под флюсом подача проволоки к месту сварки производится автоматически, а перемещение ее вдоль стыка осуществляется вручную. Флюс поступает непосредственно из бункера сварочного пистолета.

Сварка под флюсом (по сравнению с ручной) имеет следующие *преимущества*: большую производительность, лучшее качество сварных швов, более высокую экономичность процесса и лучшие условия труда.

*Повышение производительности* (в 5...25 раз) достигается за счет использования больших сварочных токов (до 2 000 А), более полного использования теплоты в закрытой зоне дуги, увеличения глубины проплавления свариваемых деталей за один проход и непрерывности самого процесса сварки. Скорость сварки обычно составляет от 20 до 150 м/ч.

*Повышение качества сварных швов* определяется, во-первых, более высокими значениями механических свойств наплавленного металла, во-вторых, улучшением формы и качества поверхности сварного шва, а также постоянством его размеров по всей длине. Высокие механические свойства шва достигаются за счет надежной защиты сварочной ванны флюсом от вредного воздействия воздушной атмосферы, более интенсивным раскислением сварочной ванны, легированием и сравнительно медленным охлаждением шва под флюсом. Улучшение формы и качества поверхности сварного шва и постоянство его размеров по всей длине достигается благодаря возможности регулирования режимов сварки, автоматизированной подаче и перемещению электродной проволоки.

*Высокая экономичность процесса сварки* достигается за счет отсутствия разбрызгивания и угара металла, что снижает расход электродной проволоки, более полного использования тепловой

мощности дуги (КПД дуги составляет 0,9...0,95), что позволяет снизить расход электроэнергии на 30...40 %, использования высокой мощности дуги (до 150 кВт и более) и плотности тока, что обеспечивает глубокий провар основного металла и позволяет сваривать изделия большой толщины (до 20 мм) за один проход без разделки кромок.

*Улучшение условий труда* обуславливается отсутствием необходимости защиты глаз от светового излучения и уменьшением количества вредных газов, выделяемых в процессе сварки.

К *недостаткам* сварки под флюсом относятся следующие:

- 1) невозможность выполнения потолочных и вертикальных швов;
- 2) трудность сварки деталей толщиной 1...2 мм и менее;
- 3) отсутствие визуального контроля за процессом горения дуги и положением электрода.

Следует отметить, что автоматическая сварка под флюсом является одним из основных способов сварки плавлением. Этим способом сваривают детали из низкоуглеродистых, низколегированных, легированных и высоколегированных сталей, а также титана, меди, алюминия и их сплавов. Данный способ применяют в серийном и массовом производстве для выполнения (в нижнем положении) длинных прямолинейных и кольцевых швов при сварке металлов толщиной 2...100 мм.

Автоматическую сварку применяют при изготовлении котлов, резервуаров для хранения жидкостей и газов, корпусов судов, мостовых балок и других изделий. Она является одним из звеньев автоматических линий для изготовления сварных автомобильных колес и станков для производства сварных прямошовных и спиральных труб.

Механизированную сварку применяют там, где автоматизировать полностью процесс нерационально (для сварки швов сложной конфигурации и небольшой протяженности).

**Дуговая сварка в защитном газе** — дуговая сварка, при которой дуга и расплавляемый металл, а в некоторых случаях и остывающий шов, находятся в защитном газе, подаваемом в зону сварки с помощью специальных устройств.

Дуговая сварка в защитном газе может быть автоматической, механизированной, ручной и производится в различных пространственных положениях. Она может выполняться неплавящимся и плавящимся электродами.

При сварке в зону дуги подается защитный газ, струя которого, обтекая электрическую дугу и сварочную ванну, предохраняет расплавленный металл от воздействия атмосферного воздуха: окисления и азотирования. В качестве защитных газов применяются инертные газы: аргон (Ar) и гелий (He), активные газы: углекислый газ (CO<sub>2</sub>) и азот (N<sub>2</sub>), а также смеси газов (Ar + He, Ar + H<sub>2</sub>, Ar + O<sub>2</sub>, Ar + CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>, Ar + O<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub>). Следует отметить, что наибольшее применение получили аргонодуговая сварка и сварка в углекислом газе.

*Аргон* — нерастворимый в жидких и твердых металлах бесцветный газ, в 1,38 раза тяжелее воздуха (поставляют и хранят в сжатом газообразном состоянии под давлением 15 МПа в стальных баллонах черного цвета с надписью синего цвета «Аргон технический» и синей полосой).

*Углекислый газ* — нерастворимый в твердых и жидких металлах бесцветный газ, со слабым запахом, в 1,52 раза тяжелее воздуха (поставляют и хранят в сжиженном состоянии под давлением 7 МПа в стальных баллонах черного цвета с надписью желтого цвета «Углекислота»).

**Аргонодуговая сварка** — дуговая сварка, при которой в качестве защитного газа используется аргон. Ее можно выполнять неплавящимся и плавящимся электродами.

Сварку *неплавящимся* вольфрамовым электродом ( $T_{пл} = 3\ 370\ ^\circ\text{C}$ ) применяют, как правило, при соединении металлических изделий толщиной 0,8...6 мм. При этом возможна сварка с расплавлением только основного металла заготовки (толщиной до 3 мм), а также при необходимости усиления шва или заполнения разделки кромок при толщинах более 3 мм с применением присадочного материала (прутка или проволоки). При ручной аргонодуговой сварке прутки подают в сварочную дугу и перемещают горелку вручную (рис. 3.18, а). Для подачи проволоки используют механизм подачи. В этом случае сварка может быть механизированной (выполняемой с помощью полуавтоматов) или автоматической. В первом случае горелка перемещается вручную, а во втором — механизмом перемещения (рис. 3.18, б).

Неплавящиеся электроды для аргонодуговой сварки изготавливают из вольфрамовых стержней диаметром 0,2...12,0 мм. Величину тока выбирают из расчета 100 А на 1 мм диаметра электрода (ориентировочно).

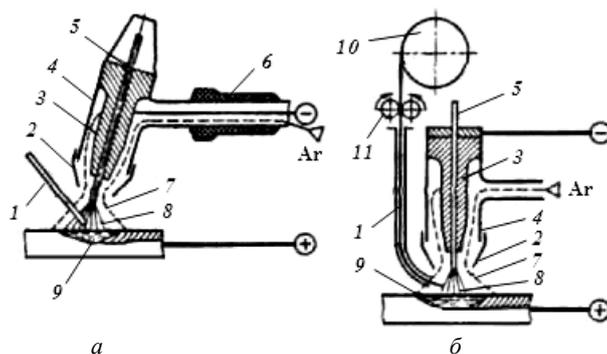


Рис. 3.18. Принципиальная схема аргодуговой сварки неплавящимся электродом: *а* — ручная; *б* — автоматическая или механизированная; 1 — присадочный пруток или проволока; 2 — сопло; 3 — токоподводящий мундштук; 4 — корпус горелки; 5 — неплавящийся вольфрамовый электрод; 6 — рукоятка горелки; 7 — атмосфера защитного газа; 8 — сварочная дуга; 9 — ванна расплавленного металла; 10 — кассета с проволокой; 11 — механизм подачи; 12 — плавящийся металлический электрод (сварочная проволока)

В качестве присадочного материала применяют стандартную сварочную проволоку из металла, сходного по химическому составу со свариваемым изделием. Диаметр присадочной проволоки выбирают в пределах 0,5...0,7 от диаметра вольфрамового электрода.

Сварку неплавящимся электродом ведут с использованием постоянного тока дугой прямой полярности. В этом случае дуга легко зажигается и устойчиво горит при напряжении 10...15 В и минимальном токе 10 А. Это позволяет сваривать металлические детали толщиной 0,8...1,0 мм.

При сварке дугой обратной полярности возрастает напряжение дуги, уменьшается устойчивость ее горения и снижается стойкость электрода. Эти особенности дуги обратной полярности не позволяют непосредственно использовать ее в сварочном процессе. Однако дуга обратной полярности обладает важным технологическим свойством: под ее действием с поверхности металла удаляются оксиды. Объясняется это тем, что поверхность металла бомбардируют тяжелые положительные ионы  $Ar^+$ , которые механически разрушают пленки оксидов. Данные свойства дуги обратной полярности используют при сварке алюминия, магния и их сплавов, применяя для

питания дуги переменный ток. В этом случае сочетаются преимущества сварки дугой как прямой, так и обратной полярности. Однако для увеличения устойчивости горения дуги в полупериод обратной полярности в электрическую схему питания дуги необходимо включать электронное устройство, подающее в этот полупериод импульс дополнительного напряжения. Таким образом, обеспечивается устойчивость горения дуги, постоянство тока и непрерывность процесса формирования шва на обеих полярностях тока.

Аргонодуговую сварку *плавящимся* электродом выполняют с использованием постоянного тока дугой обратной полярности. В этом случае электрические свойства дуги определяются наличием достаточного количества положительно заряженных ионизированных атомов металла электрода в столбе дуги. Поэтому дуга обратной полярности горит устойчиво и обеспечивает качественное формирование шва.

Сварку выполняют автоматическим или механизированным способами (рис. 3.19, а, б). Этим методом сваривают металлические изделия толщиной 3 мм и более. Непрерывное протекание процесса и хорошее качество шва достигается при высоких плотностях тока ( $100 \text{ А/мм}^2$  и более). При таких режимах сварки перенос металла становится мелкокапельным или струйным, что обеспечивает глубокое проплавление основного металла, формирование плотного шва с ровной и чистой поверхностью и разбрызгивание металла в допустимых пределах.

Из-за необходимости применения высоких плотностей тока при этом используют проволоку малого диаметра 0,6...3 мм и большую скорость ее подачи. Это достигается только механизированной подачей проволоки в зону сварки.

Среди разновидностей аргонодуговой сварки особое место занимает импульсная аргонодуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом. В этом случае, изменяя амплитуду тока, длительность импульсов и пауз между ними, можно уменьшить скорость кристаллизации сварочной ванны и ее размеры, а, следовательно, и размер зоны термического влияния. При импульсной сварке происходит увеличение глубины проплавления и снижение потребляемого количества электроэнергии. Кроме того, повышается стабильность горения дуги.

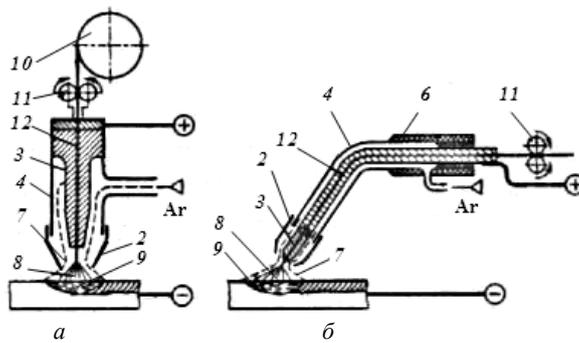


Рис. 3.19. Принципиальная схема аргонодуговой сварки плавящимся электродом: *а* — автоматическая; *б* — механизированная; 1 — присадочный пруток или проволока; 2 — сопло; 3 — токоподводящий мундштук; 4 — корпус горелки; 5 — неплавящийся вольфрамовый электрод; 6 — рукоять горелки; 7 — атмосфера защитного газа; 8 — сварочная дуга; 9 — ванна расплавленного металла; 10 — кассета с проволокой; 11 — механизм подачи; 12 — плавящийся металлический электрод (сварочная проволока)

Импульсная сварка применяется для сварки тонких изделий, поскольку кратковременное расплавление небольшой сварочной ванны позволяет избежать их прожога. Импульсная дуговая сварка может производиться и на переменном токе.

Аргонодуговую сварку применяют для соединения тонколистовых изделий из цветных (Al, Mg, Cu), в том числе тугоплавких металлов (Ti, Nb, V, Zr) и их сплавов, а также изделий из чугунов, углеродистых, легированных и высоколегированных сталей.

Аргонодуговая сварка широко применяется при ремонте агрегатов и узлов тракторов, автомобилей, сельскохозяйственных машин (например, радиатор, поддон картера, блок двигателя), а также кондиционерных трубок, силуминовых кронштейнов, корпусов и трубопроводов химических аппаратов и др.

**Дуговая сварка в углекислом газе** — дуговая сварка, при которой в качестве защитного газа используется  $\text{CO}_2$ . Сварку выполняют только плавящимся электродом (диаметр проволоки 0,2...5 мм) с использованием повышенной плотности постоянного тока (80...100 А/мм<sup>2</sup>) дугой обратной полярности.

При сварке в углекислом газе (рис. 3.20) плавящийся электрод 1 автоматически подается в зону сварки. Защита расплавленного ме-

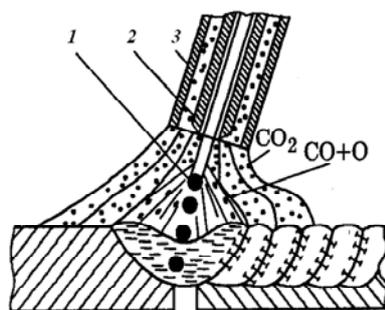


Рис. 3.20. Схема процесса дуговой сварки в углекислом газе

талла сварочной ванны осуществляется струей углекислого газа, подаваемого в зону дуги в зазор между мундштуком 2 и соплом 3 горелки. Скорость истечения газа для обеспечения ламинарного течения потока с наименьшим перемешиванием газа с воздухом и отсутствия подсоса воздуха в зону сварки выбирается равной 0,6...1,5 м/с. При больших скоростях истечения углекислого газа

происходит его завихрение, приводящее вследствие инжекции к подсосу воздуха в зону сварки.

При сварке в углекислом газе необходимо учитывать одно обстоятельство. При высоких температурах сварочной дуги  $\text{CO}_2$  диссоциирует на оксид углерода  $\text{CO}$  и атомарный кислород  $\text{O}$ , что может привести к окислению свариваемого металла. Для устранения окислительного действия атомарного кислорода сварочную проволоку дополнительно легируют  $\text{Mn}$ ,  $\text{Si}$  и  $\text{Al}$ , обладающими большим сродством к кислороду, чем  $\text{Fe}$ . Поэтому при сварке изделий из углеродистых и низкоуглеродистых сталей применяют сварочную проволоку марок Св-08ГС, Св-08ГСА, Св-08Г2С, Св-10ГС, Св-10Г2С, Св-07ГСЮ и др. При сварке такими электродами на поверхности шва образуется тонкая шлаковая корка из оксидов этих металлов.

При сварке в углекислом газе осуществляется капельный, а не струйный перенос расплавленного углеродного металла, характерный для аргонодуговой сварки. Поэтому при сварке в  $\text{CO}_2$  происходит повышенное разбрызгивание электродного металла (до 10...12%). При этом на зачистку от брызг расходуется от 30 до 40% времени, затрачиваемого на сварку. Для уменьшения разбрызгивания применяют смеси газов ( $\text{CO}_2 + (5...15)\% \text{O}_2$  или  $\text{Ar} + (10...20)\% \text{O}_2$ ). Добавление  $\text{O}_2$  или замена большей части  $\text{CO}_2$  на  $\text{Ar}$  приводит к снижению поверхностной энергии и уменьшению размеров капель электродного металла.

Для сварки в  $\text{CO}_2$  в качестве электродов часто используют порошковые проволоки, которые представляют собой металлическую трубчатую оболочку, заполненную шлакообразующими и газооб-

разующими компонентами, раскислителями или легирующими элементами. Применение порошковых проволок улучшает защиту сварочной ванны, уменьшает разбрызгивание, делает более гладкой поверхность свариваемого шва.

Разновидностью порошковых проволок являются самозащитные проволоки, оболочка которых изготовлена из легированной стали, а в наполнитель введены соединения редкоземельных металлов. Состав проволок обеспечивает устойчивость горения дуги, раскисление и защиту сварочной ванны. Самозащитные проволоки используются при механизированной сварке без газовой защиты дуги. Эти проволоки эффективно применять в случаях, когда газовая защита шва из-за конструкции сварного соединения недостаточно надежна или невозможна.

Сварка в  $\text{CO}_2$  является самым дешевым способом сварки изделий из углеродистых и низколегированных сталей. Легкая автоматизация процесса сварки, низкая стоимость углекислого газа и высокая производительность сделали дуговую сварку в среде  $\text{CO}_2$  самым распространенным способом сварки в промышленности (в том числе и ремонтном производстве). Так, по объему производства она превосходит все прочие механизированные способы сварки плавлением. Преимущества механизированной сварки в  $\text{CO}_2$  в отношении стоимости и производительности обеспечивают замену ею ручной дуговой сварки покрытым электродом.

Сваркой в  $\text{CO}_2$  сваривают конструкции из углеродистых и низколегированных сталей: газо- и нефтепроводы, корпуса судов и т. д. Самозащитные проволоки применяются при сварке неповоротных стыков труб газо- и нефтепроводов, наплавке зубьев и ковшей экскаваторов, подводной сварке и т. д.

*Преимуществами* сварки в защитных газах являются следующие:

1) высокое качество сварных соединений (благодаря эффективной защите металла, а также возможности визуального наблюдения за формированием сварного шва);

2) возможность сваривания тонкостенных изделий (толщина стенок от 0,1 мм), поскольку в процессе сварки происходит ионизация газа, то электрическая дуга горит при напряжении 10...15 В и отличается малой мощностью;

3) высокая концентрация теплоты дуги и большая, чем при ручной дуговой сварке, проплавливающая способность, что обеспечивает

меньший разогрев кромок, малую зону термического влияния и меньшую деформацию, а также большую скорость сварки;

4) отсутствие на поверхности шва оксидов и шлаковых включений, а, следовательно, и необходимости последующей очистки поверхности шва от шлаков (при аргонодуговой сварке);

5) возможность соединения металлических заготовок толщиной до 100 мм в различных пространственных положениях;

6) возможность сварки изделий практически из всех металлов и сплавов (аргонодуговая сварка);

7) высокая производительность и экономичность процесса, возможность его механизации и автоматизации;

8) относительно низкая стоимость сварки (сварка в  $\text{CO}_2$ ).

К недостаткам дуговой сварки в защитных газах относятся следующие:

1) повышенная стоимость изделий, получаемых сваркой в среде инертных газов;

2) возможность образования пористости при сварке в  $\text{CO}_2$  недостаточно раскисленных металлов;

3) нарушение процесса сварки на открытых площадках, на сквозняке, где ухудшается газовая защита свариваемого металла;

4) наличие свободного кислорода в дуге при сварке в  $\text{CO}_2$ , что ограничивает ее применение при сварке изделий из меди, алюминия, магния, титана и редких металлов, поскольку невозможно связать свободный кислород введением каких-либо раскислителей;

5) невысокая производительность при использовании ручной аргонодуговой сварки (применение автоматической сварки не всегда возможно для коротких и разноориентированных швов).

#### Вопросы для самоконтроля

1. Определение сварки. Сущность сварки плавлением и сварки давлением.

2. Классификация способов сварки.

3. Определение сварного соединения и сварного шва. Классификация сварных соединений и швов.

4. Определение свариваемости металлов и сплавов. Особенности свариваемости различных материалов.

5. Определение дуговой сварки. Дуговая сварка плавящимся и неплавящимся электродами, дугой прямой и обратной полярности.

6. Сварочная дуга и ее свойства. Источники питания электрической дуги.

7. Определение ручной дуговой сварки. Сварочные материалы, применяемые при ручной дуговой сварке, ее преимущества и недостатки.

8. Дуговая сварка под флюсом и в защитных газах: сварочные материалы, источники питания сварочной дуги, ее преимущества и недостатки.

## 2. ГАЗОВАЯ СВАРКА. КОНТАКТНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ

### 2.1. Газовая сварка

В 1840 г. немецкий химик Д. Рихман разработал аппарат для получения водорода, выделяющегося при взаимодействии азотной кислоты с цинком, что позволило, используя водородно-воздушное пламя, паять легкоплавкие металлы с помощью специальной горелки. В 1880 г. кислород и водород стали получать путем электролиза воды и использовать кислородно-водородное пламя, имеющее температуру 2 600 °С, в лабораторных условиях для расплавления платины, золота и серебра.

В 1836 г. английский химик Э. Деви впервые описал свойства ацетилена, названного им бикарбонатом водорода, а в 1860 г. французский ученый П. Берглю определил химическую формулу и дал современное название этому газу.

В 1885 г. французский ученый А. Ле Шателье, сжигая ацетилен в кислороде, получил пламя с температурой выше 3 000 °С. Он же в 1895 г. заметил, что ацетиленокислородное пламя имеет не только высокую температуру, но и не окисляет расплавленное железо. Позднее французские инженеры Э. Фуше и Ш. Пикар предложили конструкции ацетиленокислородных горелок, дающих пламя с температурой до 3 100 °С (эти конструкции почти не изменились до наших дней). Так было положено начало газопламенной сварке. С 1906 г. ее стали применять в России. Новый способ был назван автогенной сваркой (от греческих слов «автос» — сам и «генес» — возникаю). Этим подчеркивалась легкость процесса по сравнению с кузнечной сваркой, при которой соединение получали совместной ковкой наложенных друг на друга нагретых заготовок.

В настоящее время термин «автогенная сварка» не используют, а применяют термин «газовая сварка».

**Газовая сварка** — сварка плавлением, при которой для нагрева используется тепло пламени горючего газа, сжигаемого в смеси с кислородом.

Основным горючим газом является ацетилен, но иногда применяют природный газ, пропанобутановую смесь, водород и др.

*Кислород* при газовой сварке способствует интенсивному горению горючих газов и получению высокотемпературного пламени. При горении газов в воздухе температура пламени значительно ниже, чем при горении в кислороде. Кислород поставляют в сжатом состоянии в баллонах голубого цвета (с надписью черного цвета «Кислород») вместимостью 40 л (6 м<sup>3</sup> газа) под давлением 15 МПа.

*Ацетилен* С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub> при газовой сварке получил наибольшее распространение благодаря высокой температуре пламени ( $t = 3\,150\text{ °C}$ ) и большой теплоте сгорания (53 МДж/м<sup>3</sup>). Это бесцветный газ с ха-

рактрным запахом, обусловленным наличием примесей (сероводорода, фтористого водорода и др.). Ацетилен взрывоопасен при нагревании до 480...500 °С, давлении 0,14...0,16 МПа в смеси с воздухом или кислородом, а также при наличии катализаторов (оксиды меди и железа), искры или пламени.

Ацетилен для газовой сварки поступает из баллонов или ацетиленовых генераторов.

Объем стандартного ацетиленового баллона, который окрашен в белый цвет с надписью красными буквами «Ацетилен», составляет 40 л. Для обеспечения безопасного хранения и транспортировки ацетилена баллон заполняют пористым активированным углем, а для увеличения количества ацетилена в баллоне активированный уголь пропитывают растворителем — ацетоном (один объем ацетона растворяет 23 объема ацетилена). Ацетилен находится под давлением 1,9 МПа. Заполненный баллон вмещает около 5 м<sup>3</sup> ацетилена.

В ацетиленовых генераторах ацетилен получают при взаимодействии карбида кальция CaC<sub>2</sub> и воды H<sub>2</sub>O:



При этом из 1 кг CaC<sub>2</sub> получают 225 л очищенного ацетилена.

Для газовой сварки используется следующее оборудование: ацетиленовый генератор с предохранительным затвором (или баллон с ацетиленом), баллон с кислородом, ацетиленовый и кислородный редукторы, сварочная горелка со сменными наконечниками и шланги для подачи ацетилена и кислорода к ней.

Сварочная горелка является основным инструментом для газовой сварки (рис. 3.21). В горелке производится смешивание кислорода и ацетилена и создание сварочного пламени требуемого состава на выходе.

Горелки подразделяют по способу подачи в их смесительную камеру кислорода и горючего газа на горелки низкого давления (инжекторные) и равного давления (безынекторные).

Большинство сварочных горелок составляют инжекторные горелки (рис. 3.21, а). В них струя кислорода, подаваемая под давлением 0,15...0,35 МПа, выходя из сопла, подсасывает в смесительную камеру ацетилен, подаваемый под низким давлением (0,001...0,1 МПа). В сме-

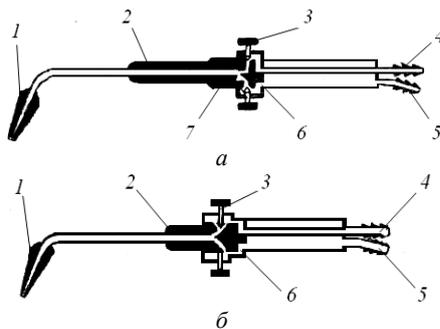


Рис. 3.21. Сварочные горелки:  
*a* — инжекторная; *б* — безынекторная;  
 1 — мундштук; 2 — смеситель; 3 — регулировочный вентиль; 4 — штуцер подачи кислорода; 5 — штуцер подачи горючей смеси; 6 — корпус горелки; 7 — инжектор

сительной камере ацетилен смешивается с кислородом, образуя горючую смесь.

В безынекторных горелках (рис. 3.21, б) горючий газ и кислород подаются под одинаковым давлением (0,1 МПа). Горелки снабжаются комплектом сменных наконечников, которые определяют их мощность. Обычно горелки имеют семь номеров сменных наконечников.

Регулируя объемные соотношения  $\beta$  кислорода  $V_k$  и ацетилена  $V_{ac}$  ( $\beta = V_k/V_{ac}$ ),

поступающих в горелку, можно получать нормальное (восстановительное), окислительное или науглероживающее пламя, характер которого выбирают в зависимости от вида свариваемых материалов.

**Нормальное (или восстановительное)** пламя теоретически должно получаться при  $\beta = 1$ . Практически из-за загрязненности кислорода нормальное пламя получается при несколько большем его количестве, т. е. при  $\beta = 1,1 \dots 1,3$ . Нормальное пламя способствует восстановлению оксидов (раскислению) металла сварочной ванны и получению качественного сварного шва. Поэтому большинство изделий из металлов и сплавов сваривают нормальным пламенем. В таком пламени сгорание ацетилена происходит последовательно в три стадии (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Стадии сгорания ацетилена в нормальном пламени		
Стадия	Химический процесс	Протекающие реакции
Первая	Распад ацетилена на составляющие	$C_2H_2 = 2C + H_2$
Вторая	Неполное сгорание	$2C + H_2 + O_2 = 2CO + H_2$
Третья	Окончательное сгорание за счет дополнительного кислорода воздуха	$2CO + H_2 + 3/2 O_2 = 2CO_2 + H_2O$

В соответствии с этими стадиями нормальное ацетиленокислородное пламя состоит из трех ясно выраженных зон: ядра *I*, восстановительной зоны *II* и факела *III* (рис. 3.22).

*Ядро* имеет форму конуса с закругленной вершиной, окруженного светящейся оболочкой. Оно состоит из свободного кислорода и продуктов распада ацетилена. Длина ядра зависит от скорости истечения горючей смеси из мундштука горелки. Чем больше давление газовой смеси, тем больше ее скорость истечения и длиннее ядро пламени. Температура в этой зоне возрастает от 300 °С (на границе с соплом) до 1 000 °С (на границе с восстановительной зоной).

*Восстановительная зона* по своему цвету (темному) заметно отличается от ядра. Она состоит, в основном, из оксидов углерода и водорода, получающихся в результате неполного распада, и называется сварочной зоной. В этой зоне на расстоянии 3...5 мм от конца ядра температура пламени достигает максимального значения (3 150 °С). Этой частью пламени производят нагревание и расплавление свариваемого и присадочного материалов. Находящиеся в этой зоне оксид углерода и водород восстанавливают образующиеся оксиды металлов.

*Факел* располагается за восстановительной зоной и состоит из углекислого газа и паров воды, которые получаются в результате окончательного сгорания оксида углерода и водорода, поступающих из восстановительной зоны. Сгорание происходит за счет кислорода окружающего воздуха. Зона факела содержит и азот, поступающий также из воздуха.

*Окислительное пламя* получается при избытке кислорода ( $\beta > 1,3$ ). Ядро такого пламени имеет меньшую длину, недостаточно резкое очертание и более бледную окраску. Длина восстановительной зоны и раз-

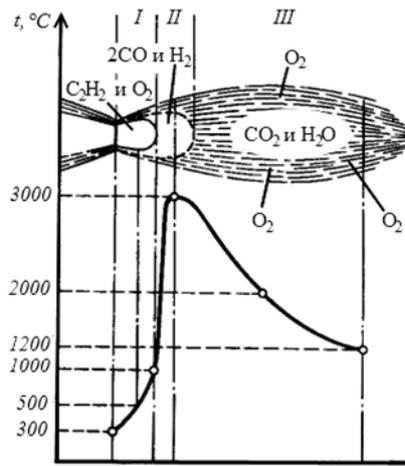


Рис. 3.22. Строение ацетиленокислородного пламени на выходе из сопла и распределение температуры по длине пламени

меры факела пламени также меньше. Пламя имеет синевато-фиолетовый оттенок. Температура этого пламени несколько выше температуры нормального пламени. Для сварки изделий из стали окислительное пламя не используется, поскольку наличие в нем избыточного кислорода приводит к окислению расплавленного металла шва, а сам шов получается хрупким и пористым. Окислительное пламя применяют только для сварки латунных изделий, поскольку при таком характере пламени избыточный кислород образует с цинком тугоплавкие оксиды, пленка которых препятствует дальнейшему испарению цинка.

**Науглероживающее пламя** получается при избытке ацетилена ( $\beta < 1,1$ ). Ядро такого пламени также теряет резкость своего очертания, а на его вершине появляется зеленоватый ореол, свидетельствующий о наличии избыточного ацетилена. Восстановительная зона значительно светлее, чем у других видов пламени, а факел имеет желтоватую окраску. Очертания зон теряют свою резкость. Избыточный ацетилен разлагается на углерод и водород. Углерод поглощается расплавленным металлом шва. Такое пламя используется при сварке изделий из чугунов и сплавов цветных металлов, поскольку в этом случае компенсируется выгорание углерода и восстанавливаются оксиды цветных металлов.

При газовой сварке для образования шва в сварочную ванну подают присадочную проволоку или прутки, близкие по химическому составу к металлу свариваемых деталей, а при соединении изделий из цветных металлов — также флюсы, которые защищают сварочный шов от окисления, раскисляют и легируют жидкий металл сварочной ванны. Применение флюсов способствует улучшению качества сварного соединения.

В качестве присадочного материала применяют сварочную проволоку Св-08 и Св-08А (при сварке неответственных стальных конструкций), а также Св-08Г, Св-08ГА, Св-10ГА, Св-14ГС и др. (при сварке ответственных конструкций). Диаметр проволоки обычно составляет 1...5 мм.

Для сварки изделий из чугуна и бронзы применяют специальные литые стержни из этих металлов, а из меди, латуни, алюминия — проволоку из соответствующего металла.

В качестве флюсов при сварке изделий из цветных металлов и некоторых специальных сплавов используют порошки или пасты: для сварки деталей из меди и ее сплавов — кислые флюсы (бура,

бура с борной кислотой); для сварки алюминиевых сплавов — бескислородные флюсы на основе фтористых и хлористых солей лития, калия, натрия и кальция.

*Преимуществами* газовой сварки являются возможность управления процессами нагрева и плавления за счет изменения интенсивности нагрева (приближая или наклоняя горелку), а также использование передвижного и довольно простого оборудования (при этом один комплект оборудования можно использовать для выполнения разнообразных сварочных работ).

По сравнению с ручной дуговой сваркой газовая сварка имеет следующие *недостатки*:

1) низкая интенсивность нагрева, приводящая к перегреву и росту зерна сварного соединения и большим деформациям основного металла;

2) низкая производительность и экономичность при сварке изделий из металлов толщиной более 5 мм;

3) сложность автоматизации процесса.

Газовой сваркой можно сваривать изделия почти из всех металлов, используемых в технике. Следует отметить, что изделия из таких металлов и сплавов, как чугун, медь и латунь, лучше поддаются газовой сварке, чем дуговой.

В настоящее время газовая сварка широко применяется при ремонте металлоконструкций и трубопроводов из тонкостенных труб, сантехнических работах, сварке изделий из сплавов на основе меди, ремонте изделий из чугуна. Эту сварку применяют в самолетостроении и при изготовлении химической аппаратуры, где преобладает сварка изделий с малыми толщинами (1...3 мм).

## 2.2. Контактные способы сварки

В 1856 г. английский физик У. Томсон (лорд Кельвин) впервые осуществил стыковую сварку, а в 1877 г. в США Э. Томсон разработал и внедрил ее в промышленное производство. В том же 1877 г. в России Н. Н. Бенардос предложил способы контактной точечной и шовной (роликовой) сварки. В 1936 г. в СССР контактная сварка (после освоения серийного выпуска контактных сварочных машин) была поставлена на промышленную основу.

Контактная сварка занимает второе место после дуговой по объему производства сварных конструкций. Около 30 % всех сварных изделий выполняют контактной сваркой.

**Контактная сварка** — группа способов сварки давлением, основанных на нагреве свариваемых деталей электрическим током и последующей пластической деформации зоны соединения.

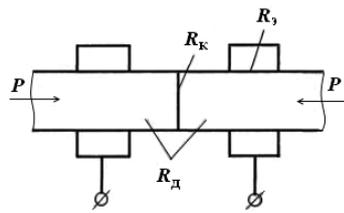


Рис. 3.23. Схема контактной сварки

Характерная особенность этой группы способов — кратковременность нагрева зоны соединения без ее оплавления или с оплавлением и быстрая пластическая деформация путем осадки свариваемых участков. При контактной сварке к двум сжатым между собой деталям с помощью специальных электродов подводят электрический ток (рис. 3.23). В соответствии с законом Джоуля Ленца количество теплоты  $Q$ , выделяемое в электрической цепи, определяется по формуле

$$Q = I^2 R \tau,$$

где  $R$  — полное сопротивление сварочного контура, Ом;  $I$  — сварочный ток, А;  $\tau$  — время протекания тока, с.

Полное электрическое сопротивление зоны сварки  $R$  состоит из сопротивления свариваемых деталей  $R_д$ , сопротивления между электродами и деталями  $R_э$ , сопротивления сварочного контакта  $R_к$  и определяется по формуле

$$R = 2R_д + 2R_э + R_к.$$

Величина  $R_к$  значительно превосходит электрическое сопротивление любого другого участка зоны сварки. Это вызвано, во-первых, резким уменьшением сечения проводника в зоне соприкасающихся поверхностей (рис. 3.24) и, во-вторых, наличием на них пленок оксидов и загрязнений (рис. 3.25), имеющих высокое электросопротивление. Высокое сопротивление в зоне контакта  $R_к$  обуславливает максимальное тепловыделение  $Q_к$  на этом участке ( $Q_к = I^2 R_к \tau$ ). Поэтому при прохождении тока заданной величины  $I$  в течение определенного времени  $\tau$  можно добиться локального нагрева зоны контакта свариваемых деталей до ее расплавления или термопластического состояния.

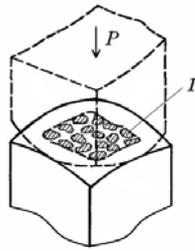


Рис. 3.24. Схематическое изображение контакта свариваемых деталей:  
1 — «пятно» единичного контакта

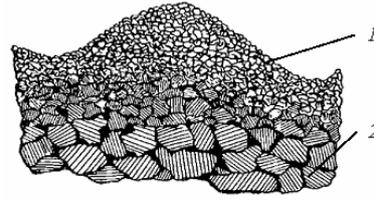


Рис. 3.25. Схема структуры поверхностного слоя: 1 — оксидная пленка; 2 — металл основы

Основными параметрами, характеризующими режимы контактной сварки, являются следующие: величина тока и время его протекания, усилие сжатия и время его действия.

В зависимости от величины тока и времени его протекания различают два режима сварки: жесткий и мягкий. *Жесткий* режим характеризуется большей силой тока и малым временем его протекания. Такой режим применяется для сварки деталей из сталей, чувствительных к нагреву и склонных к образованию закалочных структур, а также из легкоплавких цветных металлов и их сплавов. *Мягкий* режим характеризуется большей продолжительностью процесса при более низкой силе тока и постепенным нагревом металла свариваемых изделий. Такой режим используют при сварке деталей из углеродистых сталей, обладающих низкой чувствительностью к тепловому воздействию.

Совмещенные графики основных параметров контактной сварки (изменение силы тока  $I$  и усилия сжатия  $P$  в зависимости от времени  $\tau$  в процессе сварки) называют *циклограммой* (рис. 3.26).

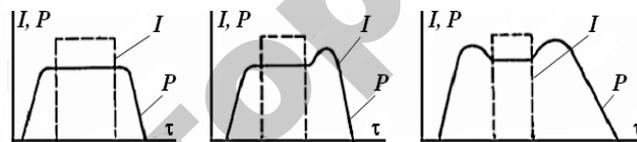


Рис. 3.26. Примеры циклограмм контактной сварки

Особенностью контактной сварки является применение кратковременных (доли секунды) импульсов сварочного тока большой

мощности (до 100 000 А) при небольшом напряжении (0,3...10 В). Выполнение сварки на таких режимах обуславливает высокую производительность процесса, обеспечивает экономию электроэнергии, снижает вероятность окисления деталей, приводит к уменьшению величины зоны термического влияния, позволяет управлять процессом локального тепловыделения и теплоотвода, т. е. процессом формирования соединения.

Основными способами контактной сварки являются точечная (в том числе рельефная), шовная и стыковая. При этом для подвода электрического тока к свариваемым деталям и деформации зоны соединения используют различные виды электродов (рис. 3.27): стержневые (для точечной сварки); плоские (для рельефной); дисковые (для шовной); зажимные контактные губки (для стыковой).

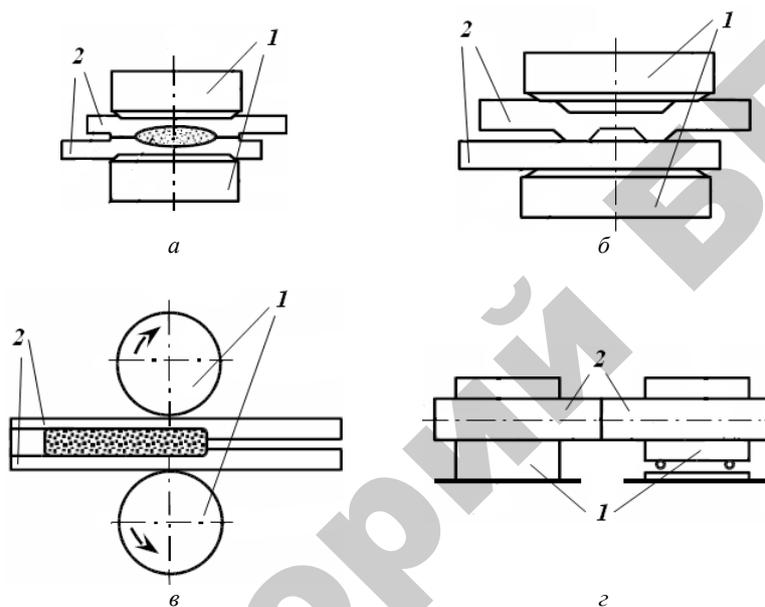


Рис. 3.27. Электроды для контактной сварки: *a* — стержневые; *б* — плоские; *в* — дисковые; *г* — зажимные губки; *1* — электрод; *2* — свариваемые детали

Установки для контактной сварки классифицируются:

- 1) по способу сварки (точечные, шовные и стыковые);
- 2) по роду тока (переменного тока и импульсные);

3) по степени механизации (автоматические, механизированные и ручные);

4) по виду исполнения (стационарные, передвижные и подвесные).

Установки для контактной сварки состоят из двух основных узлов: электрического и механического. Электрический узел состоит из трансформатора, регулятора тока, регулятора времени, прерывателя тока и других устройств, а механический — из станины и механизмов, обеспечивающих фиксацию и необходимое усилие сжатия свариваемых деталей.

**Точечная сварка** — контактная сварка, при которой сварное соединение осуществляется отдельными точками и располагается между торцами электродов, являющихся токоподводами и передающих усилие сжатия.

В зависимости от расположения электродов по отношению к свариваемым заготовкам точечная сварка может быть двусторонней и односторонней (рис. 3.28).

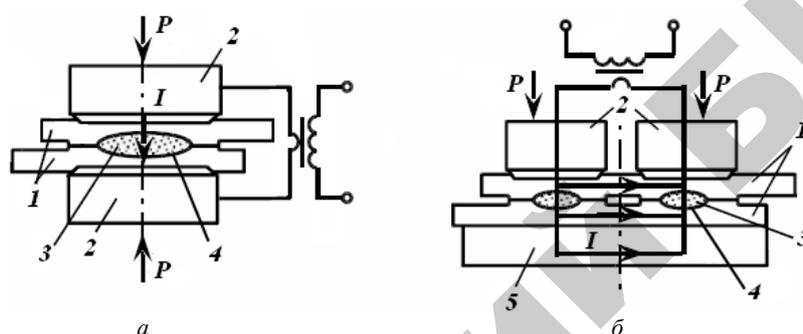


Рис. 3.28. Принципиальная схема точечной сварки: *a* — двусторонняя; *б* — односторонняя; 1 — свариваемые заготовки; 2 — стержневые электроды; 3 — линза жидкого металла; 4 — кольцо-поясок; 5 — медная подкладка

При *двусторонней точечной сварке* заготовки 1 собирают внахлестку и зажимают с некоторым усилием  $P$  между двумя стержневыми электродами 2, подводящими ток к месту сварки (рис. 3.28, *a*). Электроды изготавливаются из меди и медных сплавов, имеющих высокую электро- и теплопроводность (изнутри электроды охлаждаются водой). При прохождении электрического тока на участке контакта двух свариваемых поверхностей металл плавится,

образуя жидкое ядро 3 (линза жидкого металла). Благодаря усилиям сжатия, создаваемым электродами, твердый нагретый металл вокруг расплавленного ядра деформируется, формируя вокруг него кольцо-поясок 4, предотвращающее выплеск (вытекание) расплава в зазор между деталями. Одновременно кольцо-поясок изолирует расплавленный металл от вредного воздействия воздуха (кислорода и азота). После образования ядра расплавленного металла электрический ток выключают, и ядро затвердевает, образуя сварную точку. При пропускании электрического тока и в течение некоторого времени после отключения тока электроды сжимают детали, пластически деформируя зону контакта и препятствуя образованию усадочных раковин и трещин. При этом можно сваривать детали одной, двумя или несколькими точками. Их расположение и количество определяется расположением и количеством электродов в машине для точечной сварки.

При односторонней точечной сварке (рис. 3.28, б) два или более электрода 2 контактируют только с одной из свариваемых заготовок. При пропускании тока он распределяется между верхним и нижним свариваемыми листами 1 и проходит через свариваемый участок. Для увеличения тока, проходящего через нижний лист, снизу дополнительно устанавливается медная подкладка 5. Односторонней сваркой соединяют заготовки одновременно двумя и более точками.

Параметрами режимов точечной сварки являются зависимости изменения усилия сжатия  $P$  и силы тока  $I$  от времени протекания процесса  $\tau$ . На рисунке 3.29 показана одна из применяемых циклограмм точечной сварки. Весь цикл сварки состоит из четырех стадий: *I* — сжатие свариваемых заготовок между электродами;

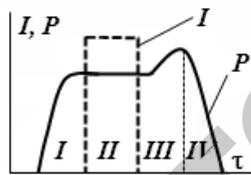


Рис. 3.29. Пример циклограммы точечной сварки:

$I$  — сварочный ток;  $P$  — усилие сжатия;  $\tau$  — время

*II* — включение тока и разогрев места контакта до температуры плавления, сопровождающийся образованием жидкого ядра; *III* — выключение тока и увеличение усилия сжатия для улучшения качества сварного точечного соединения; *IV* — снятие усилия с электродов.

Точечную сварку выполняют на мягких и жестких режимах.

Основные параметры мягких режимов следующие: плотность тока — 80...160 А/мм<sup>2</sup>, усилие сжатия — 15...40 МПа, время протекания тока — 0,5...3,0 с. На таких режимах сваривают детали из углеродистых, низколегированных сталей и сталей, склонных к закалке.

Параметры жестких режимов следующие: плотность тока — 120...360 А/мм<sup>2</sup>, усилие сжатия — 4...150 МПа, время протекания тока — 0,001...0,01 с. Такие режимы применяют при сварке изделий из коррозионно-стойких сталей, алюминиевых и медных сплавов, а также для соединения деталей из тонколистовых материалов. При сварке деталей из коррозионно-стойких сталей и использовании мягких режимов из-за длительности процесса возможно выпадение карбидов хрома в околошовной зоне и, как следствие, потеря коррозионной стойкости. При сварке изделий из алюминиевых, медных сплавов и тонколистового металла (фольги) толщиной до 0,1 мм мягкие режимы не применяют из-за трудностей, связанных с организацией тепловыделения, необходимого для локального расплавления металла при формировании сварной точки.

Точечная сварка — универсальный способ, применяемый при соединении изделий из низкоуглеродистых, углеродистых, низколегированных, конструкционных и коррозионно-стойких сталей, алюминиевых и медных сплавов. Этот способ широко используется в автомобиле-, вагоно- и авиастроении, строительстве, радиоэлектронике и т. д. Диапазон свариваемых толщин изделий составляет от нескольких микрометров до трех миллиметров.

Разновидностью точечной сварки является рельефная сварка.

**Рельефная сварка** — вид контактной сварки, при котором детали соединяются одновременно в нескольких точках, положение которых определяется выступами (рельефами), образованными штамповкой или обработкой резанием на одной или обеих деталях. При рельефной сварке контакт между деталями определяется не формой рабочей части электродов, как при точечной сварке, а формой поверхности деталей в месте их соединения.

При рельефной сварке (рис. 3.30) заготовки 1 зажимают между плоскими электродами (контактными плитами) 2. Соединение происходит в зонах выступов 3, которые могут быть получены листовой штамповкой на одной из заготовок. При включении тока верхний электрод сжимает заготовки. Деформируют их до окончания процесса сварки.

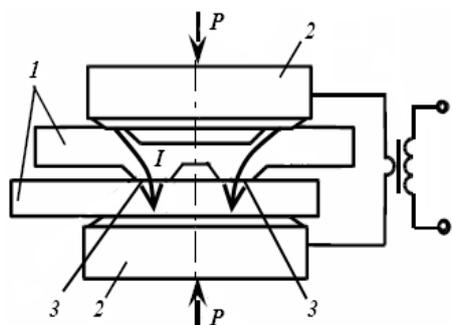


Рис. 3.30. Принципиальная схема рельефной сварки: 1 — свариваемые заготовки; 2 — плоские электроды; 3 — выступы

Таким образом, за один ход машины выполняется столько сварных точек, сколько было отштамповано выступов. Рельефная сварка используется для крепления кронштейнов к листовым деталям (например, скобы к капоту автомобиля, петли для навески дверей к кабине), сварки строительной арматуры, для приварки крепежных деталей (болтов, гаек и шпилек) к листовому материалу, крепления проволоки к тонким деталям в радиоэлектронике и т. п. (рис. 3.31). Рельефная сварка по непрерывным рельефам обеспечивает получение герметичных соединений.

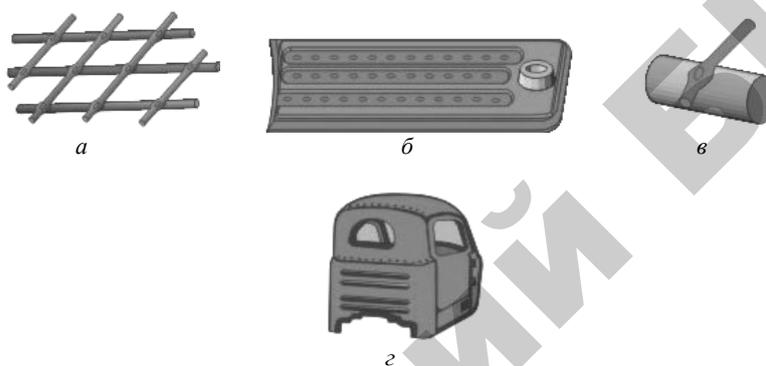


Рис. 3.31. Примеры рельефной сварки: а — строительная арматура; б — радиатор отопления; в — поплавок; г — кабина

**Шовная сварка** — контактная сварка, при которой соединение свариваемых частей осуществляется группами точек и происходит оно между вращающимися токоподводящими дисковыми электродами, передающими усилие сжатия и перемещающими свариваемые детали. Если точки перекрывают друг друга, то шов получается герметичным. В противном случае шов ничем не отличается от ряда отдельных точек, выполненных точечной сваркой, и не является негер-

метичным. Диаметр электродов при сварке металлических изделий толщиной 2...3 мм обычно составляет 150...200 мм, а толщиной менее 0,5 мм — 40...50 мм. Для изготовления электродов для шовной и точечной сварки используется медь М1, а также бронза (кадмиевая, хромистая, бериллиевая) и другие сплавы.

В процессе шовной сварки листовые заготовки *1* соединяют внахлестку и сжимают между дисковыми электродами *2*, которые передают усилие сжатия свариваемым заготовкам и одновременно их перемещают (рис. 3.32). К дисковым электродам подводится электрический ток, который, как и при точечной сварке, нагревает и расплавляет участки контактирующих поверхностей свариваемых деталей.

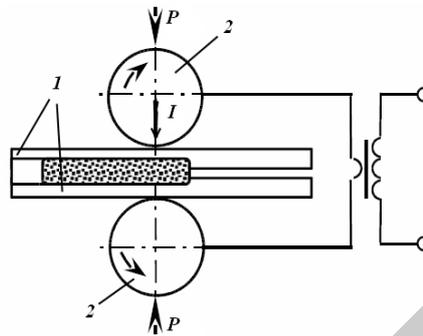


Рис. 3.32. Принципиальная схема шовной сварки: *1* — свариваемые заготовки; *2* — дисковые электроды

Шовная сварка (как и точечная) может быть двусторонней и односторонней. Последнюю применяют в тех случаях, когда невозможно подвести электроды с двух сторон к свариваемому изделию. При односторонней сварке два или более дисковых электродов контактируют только с одной из свариваемых заготовок.

Шовную сварку, осуществляемую при различных режимах подачи тока и вращения дисковых электродов, условно можно разделить на непрерывную, прерывистую и шаговую. Циклограммы ее основных режимов представлены на рисунке 3.33.

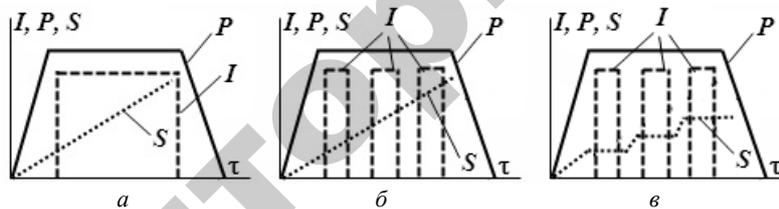


Рис. 3.33. Циклограммы шовной сварки: *а* — непрерывная; *б* — прерывистая; *в* — прерывисто-шаговая; *I* — сварочный ток; *P* — усилие сжатия; *S* — перемещение роликов;  $\tau$  — время

При **непрерывной** шовной сварке осуществляется непрерывное вращение дисковых электродов и непрерывная подача тока (рис. 3.33, а). Такая сварка может быть выполнена только при больших скоростях вращения электродов. Однако она не обеспечивает требуемого качества сварного соединения и приводит к быстрому износу электродов. Поэтому такой вид шовной сварки используется редко. Он применяется только при сварке листов толщиной до 1 мм, при получении коротких швов, при соединении изделий из металлов и сплавов, не склонных к росту зерна и не претерпевающих заметных структурных превращений при перегреве околошовной зоны (низкоуглеродистые и низколегированные стали).

Наиболее распространенным вариантом шовной сварки является **прерывистая** (рис. 3.33, б). В этом случае электроды вращаются непрерывно, а ток периодически включается на определенные промежутки времени. При каждом включении тока образуется одна сварная точка (включение тока и вращение электродов синхронизировано так, чтобы точки перекрывались и шов был герметичным) (рис. 3.34).

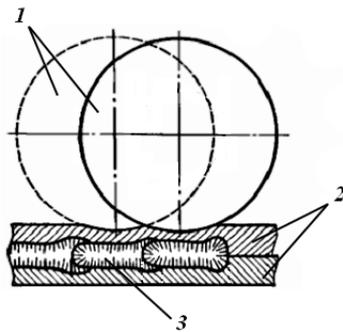


Рис. 3.34. Схема получения герметичного шва при шовной прерывистой сварке: 1 — дисковые электроды; 2 — свариваемые заготовки; 3 — герметичный шов, получаемый при перекрытии сварных точек

Прерывистая сварка обеспечивает стабильность процесса и высокое качество сварного соединения при малой зоне термического влияния и применяется при получении длинных швов на листовых заготовках толщиной до 3 мм из коррозионно-стойких сталей и алюминиевых сплавов. Скорость прерывистой сварки на отдельных участках может достигать 10 м/мин. Способ прерывистой шовной сварки получил наибольшее распространение благодаря меньшему, чем при непрерывной сварке, перегреву роликов и заготовок.

При **прерывисто-шаговой** сварке электроды вращаются прерывисто, перемещая деталь лишь на шаг, а ток включают во время остановки электродов (рис. 3.33, в). Такой режим обеспечивает более рельефный шов за счет качественного формирования сварной точки, способствует лучшему охлаждению рабочей поверхности

электродов и продлению срока их службы. Шаговая сварка применяется для сварки изделий из алюминиевых сплавов и плакированных металлов. Толщина свариваемых листов при шаговой сварке составляет до 3 мм. Однако машины для реализации шагового способа сварки с периодическим вращением роликов отличаются сложностью конструкции и малой производительностью.

Шовная сварка применяется при изготовлении всевозможных листовых конструкций (толщина свариваемых листов составляет 0,3...3 мм), различных герметичных емкостей (например, топливных баков автомобилей и летательных аппаратов, емкостей и камер бытовой техники, плоских отопительных радиаторов и т. п.). Шовная сварка обеспечивает получение прочных и плотных швов при производстве чувствительных элементов в приборостроении. Плотность соединений при шовной сварке обеспечивает высокую надежность работы сварных конструкций в условиях низкого вакуума или больших давлений рабочей среды.

Этим способом сваривают изделия из низкоуглеродистых, легированных, конструкционных сталей, легких сплавов, некоторых медных и титановых сплавов, а также стальные листы с покрытием (оцинкованные, луженые, освинцованные и др.).

Стадии многооперационной шовной сварки молочного бидона представлены на рисунке 3.35.

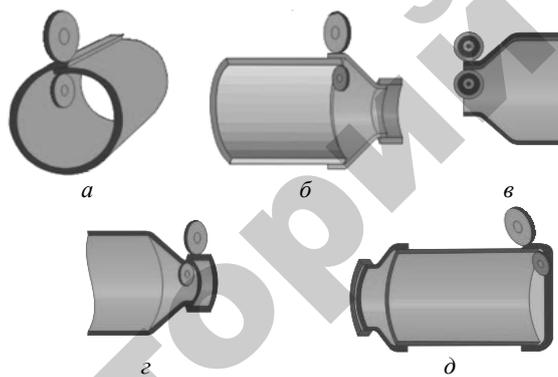


Рис. 3.35. Процесс изготовления молочного бидона способом шовной сварки:  
а — сварка цилиндрической части; б — приварка конической к цилиндрической части; в — сварка конической части; г — приварка крышки к конической части;  
д — приварка дна к цилиндрической части

Разновидностью шовной сварки является шовно-стыковая сварка, которая применяется для соединения труб с продольным сварным швом.

**Шовно-стыковая сварка** — контактная сварка с получением стыкового шва вращающимися дисковыми электродами, относительно которых перемещаются детали, собранные с небольшой нахлесткой или встык.

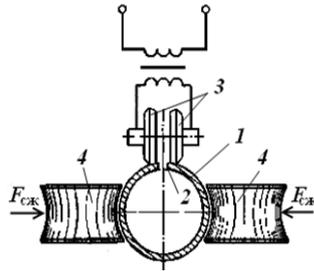


Рис. 3.36. Схема шовно-стыковой сварки

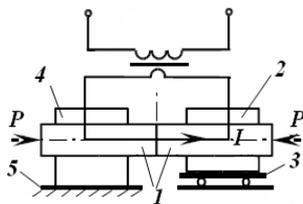


Рис. 3.37. Принципиальная схема контактной стыковой сварки

Губка-электроды стыковой машины (рис. 3.37). Губка-электрод 2 установлен на подвижной плите 3, губка-электрод 4 закреплен на неподвижной плите 5. Сварочный трансформатор соединен с губками-электродами гибкими шинами. Подвижную плиту перемещают, и заготовки 1 сжимаются под действием силы  $P$ , обеспечиваемой специальным механизмом сжатия.

Существует две разновидности процесса стыковой сварки: сварка сопротивлением и сварка оплавлением.

При сварке *сопротивлением* детали с предварительно тщательно обработанными торцами, закрепленные в губках-электродах сварочной машины, сжимают с усилием  $P$ , а затем включают электрический

При шовно-стыковой сварке (рис. 3.36) трубная заготовка 1 с верхним расположением стыка кромок 2 подается под дисковые электроды 3, к которым подводится сварочный ток. Прижимные ролики 4 за счет усилия сжатия  $F_{сж}$  обеспечивают контактирование свариваемых участков стыка.

Этим способом изготовляют стальные трубы диаметром 14...600 мм с толщиной стенок 0,5...12,5 мм.

**Стыковая сварка** — контактная сварка, при которой соединение свариваемых частей происходит по всей поверхности их касания. В процессе стыковой сварки свариваемые заготовки 1 закрепляют в зажимных контактных губках-электродах стыковой машины (рис. 3.37).

ток. При прохождении электрического тока максимальное количество теплоты начинает выделяться в месте стыка деталей из-за наличия микронеровностей и микровыступов на свариваемых поверхностях. Нагрев приводит к повышению пластичности свариваемых поверхностей и смятию микровыступов, в результате чего площадь контакта увеличивается, сопротивление уменьшается, и выделение тепла происходит преимущественно в самих деталях за счет их электросопротивления, которое увеличивается с повышением температуры. Когда температура достигнет  $0,8...0,9 T_{пл}$  металла свариваемых деталей, их осаживают с усилием  $P_{осад}$  (большим первоначального усилия сжатия  $P$ ) и происходит сварка с образованием плавного утолщения в месте соединения (рис. 3.38, *a*).

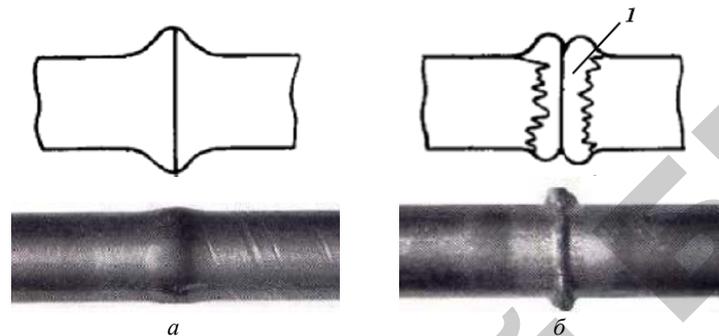
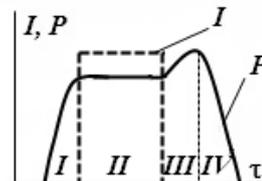


Рис. 3.38. Схемы соединений, полученных стыковой сваркой:  
*a* — сопротивлением; *b* — оплавлением; *l* — грат

Циклограмма стыковой сварки сопротивлением представлена на рисунке 3.39. Весь цикл сварки состоит из четырех стадий: *I* — сжатие свариваемых заготовок усилием  $P$ ; *II* — включение тока и разогрев места контакта до температуры  $0,8...0,9 T_{пл}$ ; *III* — выключение тока и осадка металла с усилием  $P_{осад}$ ; *IV* — снятие усилия с электродов.



Сварка сопротивлением требует высокой точности обработки и плотности прилегания свариваемых поверхностей, поэтому торцы деталей

Рис. 3.39. Циклограмма стыковой сварки сопротивлением:  
*I* — сварочный ток;  $P$  — усилие сжатия;  $\tau$  — время

подвергают тщательной механической или химической очистке. Недостатки подгонки (перекос, зазор) приводят к неравномерному прогреву деталей, образованию оксидов на неприлегающих поверхностях и, тем самым, к снижению качества сварного соединения. Допустимые отклонения размеров стыкуемых поверхностей круглых сечений составляют не более 2 %, прямоугольных — не более 1,5 %.

Этим способом сваривают детали из низкоуглеродистых сталей, круглого или прямоугольного сечения площадью до 250 мм<sup>2</sup> и из легированных сталей площадью до 20 мм<sup>2</sup> (проволока, прутки, толстостенные трубы малого диаметра). Изделия из цветных металлов и их сплавов также хорошо свариваются сваркой сопротивлением. Этим способом можно соединять и детали из разнородных металлов (сталь с медью, латунь с медью), а также изделия из различных марок сталей между собой.

При стыковой сварке **оплавлением** используют оборудование такое же, как и при сварке сопротивлением. Основное отличие способа сварки оплавлением (от сварки сопротивлением) состоит в том, что свариваемые стыки деталей не требуют предварительной обработки (очистки от загрязнений и пленок оксидов), а в процессе сварки тонкий слой материала на стыкуемых поверхностях доводят до расплавления. При последующем сжатии свариваемых деталей расплавленный металл вместе с оксидами выдавливается из стыка, а горячий твердый металл деформируется, создавая соединение с небольшим уширением и гратом 1 (оторочка из окисленного, перегоревшего металла) (рис. 3.38, б).

Различают сварку непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом.

Для сварки **непрерывным оплавлением**, включив трансформатор, медленно приводят в соприкосновение поверхности свариваемых деталей (рис. 3.40). В начальный момент их касания площадь соприкосновения поверхностей мала (рис. 3.40, а). Металл в точках контакта мгновенно нагревается до кипения и испаряется со взрывом перемычки 1 (рис. 3.40, б). Взрыв выбрасывает часть металла вместе с пленками оксидов в виде искр и брызг (рис. 3.40, в). При дальнейшем сближении деталей контактные перемычки 2, 3 и 4 непрерывно возникают и разбрызгиваются до тех пор, пока на торцах не образуется слой расплавленного металла 5 (рис. 3.40, г). На этом этапе сварки длина сва-

риваемых деталей уменьшается. Контактное сопротивление во время плавления значительно больше сопротивления деталей, поэтому нагревается, в основном, зона стыка.

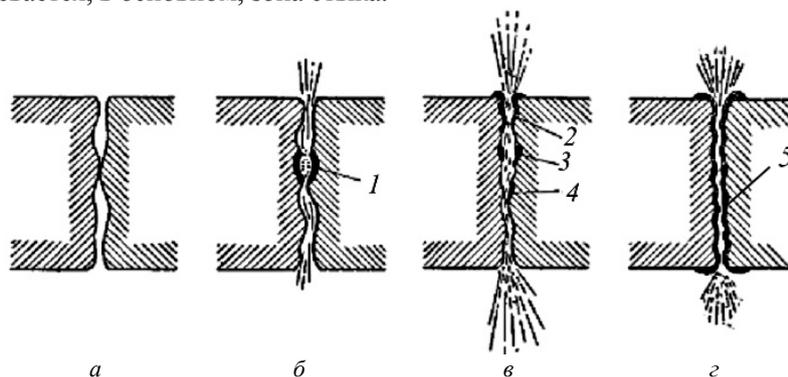


Рис. 3.40. Схема процесса стыковой сварки непрерывным оплавлением

Режимы стыковой сварки характеризуются силой и длительностью импульсов сварочного тока, усилием и скоростью осадки, а также установочной длиной. Усилие зажатия заготовок в губках для предотвращения проскальзывания должно быть в 1,5 раза больше усилия осадки. При сварке оплавлением изделий из низкоуглеродистых сталей плотность тока составляет  $10...30 \text{ A/mm}^2$ , скорость осадки — не менее  $30 \text{ м/с}$ , давление осадки  $P_{\text{осад}}$  —  $60...80 \text{ МПа}$ . Детали из коррозионно-стойких сталей сваривают при  $P_{\text{осад}} = 240...4\,000 \text{ МПа}$ , а скорость осадки составляет не менее  $50 \text{ м/с}$ , поскольку эти стали жаропрочны и склонны к окислению.

Циклограмма стыковой сварки непрерывным оплавлением представлена на рисунке 3.41.

Способом сварки непрерывным оплавлением с постоянной скоростью подачи сваривают детали с компактным сечением до  $1\,000 \text{ мм}^2$  и с развитым периметром несколько большего сечения (тонкостенные трубы, листы, рельсы, сверла, цепи, трубопроводы, полосы и др.). Этим

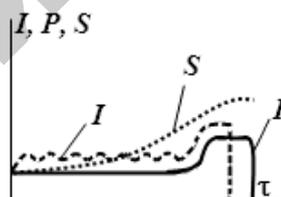


Рис. 3.41. Циклограмма стыковой сварки оплавлением:  $S$  — перемещение плиты;  $P$  — усилие сжатия;  $I$  — сварочный ток

способом возможна сварка изделий из разнородных металлов. *Преимуществом* этого способа сварки является высокая производительность, а *недостатком* — значительные потери металла на угар и разбрызгивание.

При сварке *оплавлением с подогревом* (как и при сварке сопротивлением) детали вначале нагревают, не доводя до плавления. Для этого их периодически сжимают небольшим усилием, нагревая проходящим током, и размыкают. После подогрева до определенной температуры детали разводят, оплавляют (как при сварке с непрерывным оплавлением) и сжимают. Сварка оплавлением с подогревом позволяет уменьшить мощность оборудования, необходимого для сварки деталей с большими сечениями. Этим способом сваривают детали сечением 5 000...10 000 мм<sup>2</sup>.

Стыковая сварка оплавлением применяется для соединения трубопроводов, арматурных стержней железобетонных изделий, железнодорожных рельсов (бесстыковые пути) в стационарных и полевых условиях, длиномерных заготовок из различных конструкционных сталей и сплавов цветных металлов. Ее широко используют при изготовлении режущего инструмента (например, рабочую часть сверла из инструментальной стали сваривают с хвостовой частью из конструкционной стали).

Примеры применения стыковой сварки представлены на рисунке 3.42.

*Преимуществами* контактной сварки являются следующие:

- 1) высокая производительность (время сварки одной точки или стыка составляет 0,02...1,0 с);
- 2) возможность автоматизации сварочных работ, позволяющая встраивать машины контактной сварки в поточные сборочные линии;
- 3) качество и надежность сварных соединений, достигаемые за счет быстрого нагрева и охлаждения металла, приводящих к малой зоне термического влияния;
- 4) возможность получения соединений сваркой (точечной и шовной) алюминиевых, магниевых, титановых сплавов, обусловленная возникновением в процессе сварки защитного пояса, изолирующего расплавленный металл от воздействия атмосферы;
- 5) отсутствие потребности в специальных технологических материалах (присадочная проволока, флюсы, газы и т. п.);
- 6) культура производства и благоприятные условия труда.



Рис. 3.42. Примеры применения стыковой сварки: *a* — сварка метчика; *б, в* — сварка труб; *г* — сварка заготовки венца для маховиков или подшипников; *д* — сварка рам

### Вопросы для самоконтроля

1. Определение газовой сварки. Материалы и оборудование, используемые для газовой сварки.
2. Определение контактной сварки. Классификация способов и режимы контактной сварки.
3. Определения точечной и рельефной сварки. Режимы точечной сварки.
4. Определение шовной и шовно-стыковой сварки. Классификация видов и режимы шовной сварки.
5. Определение стыковой сварки. Классификация видов и режимы стыковой сварки.

### 3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ. РЕЗКА, ПАЙКА, НАПЛАВКА И НАПЫЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

#### 3.1. Специальные способы сварки

**Электрошлаковая сварка** — сварка плавлением, при которой расплавление электродной проволоки и кромок свариваемых заготовок производится теплотой расплавленного флюса (шлака), выделяемой при прохождении через него электрического тока.

Метод электрошлаковой сварки (ЭШС) был разработан сотрудниками Института электросварки им. Е.О. Патона в начале 50-х гг. XX века. На международной выставке в Брюсселе в 1958 г. этот вид сварки был отмечен большой золотой медалью «Гран-при» и получил неофициальное название «Русская сварка».

Флюсы, применяемые для электрошлаковой сварки, при расплавлении должны обладать высокой электропроводностью, поэтому в них, наряду с компонентами, используемыми при дуговой сварке под флюсом ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), содержится 14...92,6 %  $\text{CaF}_2$ , являющегося основой природного минерала — плавикового шпата.

Электродная проволока, применяемая при электрошлаковой сварке, аналогична проволоке, используемой для дуговой сварки под флюсом.

Электрошлаковая сварка применяется для соединения деталей толщиной 40 мм и более, т. е. толщина свариваемых деталей практически неограничена.

Процесс электрошлаковой сварки (рис. 3.43) осуществляется следующим образом.

1. В зазор между соединяемыми деталями 2 насыпается флюс и вводятся электроды 1 (один или более). Используемые электроды могут быть проволочными (рис. 3.43, а) или пластинчатыми (рис. 3.43, б).

2. Между электродами и основным металлом под слоем флюса возбуждается дуга. Теплота, выделяемая при горении дуги, плавит флюс. При этом образуется шлаковая ванна 3, уровень которой постепенно повышается. Расплавленный шлак, обладая электропроводностью, шунтирует дугу, и ее горение прекращается.

3. Нагрев и расплавление электродов, флюса и кромок свариваемых деталей продолжаются за счет тепла, выделяющегося при протекании тока через жидкий шлак, температура которого выше температуры плавления материалов (электродов и металла основы).

4. Плавящийся металл электродов в виде капель стекает вниз, образует ванну жидкого металла 4, которая заполняет зазор между деталями. Шлаковая ванна находится над поверхностью ванны жидкого металла и защищает ее от воздействия воздуха.

5. Шлаковая и металлическая ванны удерживаются от вытекания специальными формирующими устройствами — подвижными или неподвижными медными ползунами 5, которые расположены сбоку и охлаждаются водой, а также технологической подкладкой снизу. Кристаллизующийся в нижней части металлической ванны расплавленный металл образует вертикальный сварочный шов 7, который формируется снизу вверх.

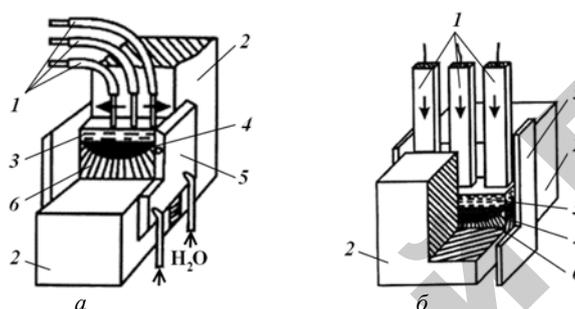


Рис. 3.43. Схема процесса электрошлаковой сварки: а — с проволочными электродами; б — с пластинчатыми электродами; 1 — электрод; 2 — соединяемые детали; 3 — шлаковая ванна; 4 — ванна жидкого металла; 5 — медные ползуны; 6 — сварочный шов

*Преимуществами* электрошлаковой сварки являются следующие:

1) экономичность, обусловленная снижением (по сравнению с автоматической сваркой под слоем флюса) в 15...20 раз расхода флюса, который не превышает 5 % массы наплавляемого металла, а также экономией электроэнергии, поскольку электрошлаковый процесс устойчиво протекает при плотностях тока от 0,1 А/мм<sup>2</sup> (при дуговой сварке — 20...30 А/мм<sup>2</sup>). При этом доля основного металла в шве может быть снижена на 10...20 %;

2) высокая производительность процесса, повышающаяся с ростом толщины свариваемых деталей, обусловленная непрерывностью процесса и возможностью сварки за один проход металлов практически любой толщины (более 40 мм), а также отсутствием необходимости разделки кромок (снятия фасок);

3) хорошее качество сварного соединения (благодаря надежной защите расплавленного металла жидким шлаком от воздействия атмосферы), отсутствие многослойности и получение более однородного по строению однопроходного шва.

Электрошлаковой сварке присущи следующие *недостатки*:

1) она технически возможна при толщине металла более 16 мм и, как правило, выгодна при сварке металла толщиной более 100 мм;

2) позволяет сваривать только вертикальные швы;

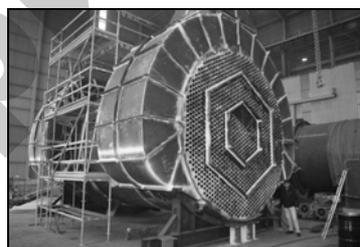
3) в металле шва и околошовной зоны возможно образование крупнозернистой дендритной структуры, что требует проведения дополнительной термической обработки (отжиг или нормализация) сварного соединения.

Электрошлаковую сварку широко используют в промышленности для соединения заготовок большой толщины из стали и чугуна, меди, алюминия, титана и их сплавов.

Электрошлаковая сварка позволила изменить технологию производства крупногабаритных изделий путем замены крупных литых или кованных деталей сварно-литыми или сварно-коваными из более мелких поковок или отливок (например, станины и детали мощных прессов и станков, коленчатые валы судовых дизелей, роторы и валы гидротурбин, котлы высокого давления, химические реакторы, теплообменники и т. п.) (рис. 3.44).



*а*



*б*

Рис. 3.44. Примеры применения электрошлаковой сварки: *а* — химический реактор (толщина стенки — 80 мм); *б* — теплообменник

**Плазменная сварка** — сварка плавлением, при которой нагрев проводится сжатой дугой (плазмой).

Плазменную сварку начали применять с середины 50-х гг. XX века. В 60-х гг. были разработаны ручные и механизированные установки для ее реализации. В 1965 г. в Швейцарии фирмами «Сешерон» и «Мессер-Грисхайм» была разработана технология микроплазменной сварки тонколистовых материалов малоамперной импульсной дугой, рассчитанной на сварочный ток не более 30...40 А.

*Плазмой* называется частично или полностью ионизированный газ, состоящий из нейтральных атомов и молекул, а также электрически заряженных ионов и электронов, который в зависимости от состава среды имеет температуру от 10 000 до 50 000 °С. Плазму иногда называют четвертым (после твердого, жидкого и газообразного) агрегатным состоянием вещества.

Основным инструментом для получения сжатой дуги (плазмы) при плазменной сварке являются плазмотроны, в которых нагревание газа и его ионизация осуществляются дуговым разрядом в специальных камерах. Их принцип действия основан на принудительном сжатии столба дуги потоком газа. В качестве плазмообразующих газов применяют азот, аргон, водород, гелий, воздух или их смеси. Сжатие столба дуги приводит к повышению в ней плотности энергии, а, следовательно, и температуры. В результате струя проходящего через плазмотрон газа, нагреваясь до высоких температур, ионизируется и приобретает свойства плазмы.

Существуют два способа плазменной сварки (рис. 3.45): сварка **плазменной дугой** (дуга горит между неплавящимся электродом и изделием) и **плазменной струей** (дуга горит между неплавящимся электродом и соплом плазмотрона и выдувается потоком газа на свариваемое изделие). Реализация этих способов сварки осуществляется с помощью плазмотронов прямого и косвенного действия соответственно.

В плазмотронах прямого действия (рис. 3.45, а) плазменная дуга 2 горит между неплавящимся вольфрамовым электродом 6 (катодом) и свариваемым изделием 4 (анодом). Сопло 5, служащее для сжатия и стабилизации дуги, отделено от катодного узла 8 с помощью электроизолятора 7 и является электрически нейтральным. Плазмотрон питается постоянным током от источника с падающей вольтамперной характеристикой, а плазменную дугу зажигают с помощью осциллятора.

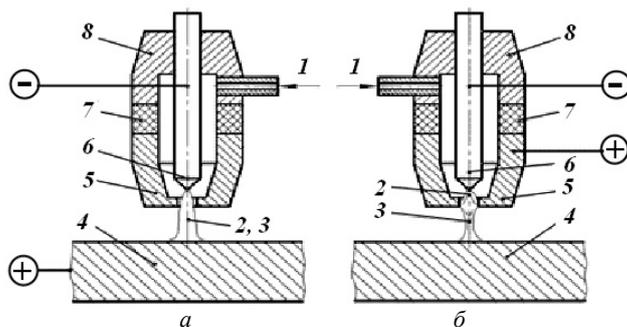


Рис. 3.45. Способы плазменной сварки: *a* — плазменной дугой; *б* — плазменной струей; 1 — подача газа; 2 — дуга; 3 — струя плазмы; 4 — свариваемый металл; 5 — сопло; 6 — электрод; 7 — электроизолятор; 8 — катодный узел

В плазматронах косвенного действия (рис. 3.45, *б*) плазменная дуга 2 горит между неплавящимся электродом 6 и соплом плазматрона 5, а поток плазмы выдувает плазменную струю 3.

Плазменная дуга, истекающая из плазматрона с дугой прямого действия (в отличие от плазматронов с дугой косвенного действия), совмещена со столбом дуги и поэтому характеризуется более высокой температурой и тепловой мощностью. При этом КПД плазматронов с дугой прямого действия значительно выше КПД плазматронов с дугой косвенного действия (70...80 % и 30...40 % соответственно). В этой связи плазматроны с дугой прямого действия целесообразно применять не только для сварки, но и для резки, наплавки и других видов обработки металлов.

В зависимости от силы сварочного тока различают три разновидности плазменной сварки: микроплазменная ( $I_{св} = 0,1...25$  А); плазменная сварка на средних токах ( $I_{св} = 50...150$  А); плазменная сварка на больших токах ( $I_{св} > 150$  А).

В отличие от электрической дуги плазменная дуга характеризуется более высокой температурой, меньшим диаметром и цилиндрической формой (при электродуговой сварке дуга имеет коническую форму), большим давлением на жидкий металл (в 6...10 раз) и возможностью устойчивого горения при малых токах (0,2...30 А).

Данные отличия от электродуговой сварки обеспечивают следующие *преимущества* плазменной сварки:

1) более глубокое проплавление металла (при одновременном уменьшении объема его расплавления) позволяет сваривать более толстые металлические изделия (до 10 мм) без разделки кромок и применения присадочного материала;

2) использование высококонцентрированного источника теплоты приводит к уменьшению зоны термического влияния (следовательно, и сварочных деформаций);

3) высокая стабильность горения дуги при малых токах обеспечивает повышенное качество сварных соединений из тонколистовых (0,025...0,8 мм) материалов;

4) цилиндрическая форма дуги и возможность существенного увеличения ее длины позволяют осуществлять сварку в труднодоступных местах, а также при изменении расстояния от сопла горелки до изделия.

*Недостатком* плазменной сварки является недолговечность горелок из-за частого выхода из строя сопел и электродов.

Плазменную сварку используют для соединения деталей из меди и ее сплавов, алюминиевых сплавов и высоколегированных сталей. Толщина свариваемых изделий составляет 0,5...15 мм, а скорость сварки — 4...30 м/ч и более.

Микроплазменная сварка является одним из основных способов соединения деталей из тонких металлов и сплавов в самолетостроении, атомной, газовой, электронной, медицинской и других отраслях промышленности для изготовления сильфонов, миниатюрных трубопроводов, полупроводниковых приборов и многих других изделий. Данным способом сваривают листы толщиной 0,025...0,8 мм из углеродистой и коррозионно-стойкой стали, меди, никелевых сплавов, титана, молибдена, тантала, вольфрама, золота. Процесс ведут в непрерывном или импульсном режиме со скоростью порядка 6...25 м/ч. Микроплазменной сваркой можно выполнять соединение деталей во всех пространственных положениях.

*Электронно-лучевая сварка* — сварка плавлением, при которой для нагрева используется энергия ускоренных электронов.

Явление термического воздействия электронных пучков на твердые материалы было отмечено в докладе В. Гроува, прочитанного в Лондонском Королевском Обществе в апреле 1852 г. Позднее благодаря развитию вакуумной техники и электронной оптики этот источник нагрева получил широкое применение при сварке трудносвариваемых металлов, обладающих высокими

температурой плавления и химической активностью (молибден, тантал, ниобий, вольфрам, цирконий). Для их сварки необходимо использование высококонцентрированных источников нагрева и защиты зоны сварки от влияния воздушной атмосферы.

Разработка техники и технологии электронно-лучевой сварки связана с работами французских и американских инженеров Д. А. Стора, Д. Бриолы и В. Л. Вимена, которые были опубликованы в 1957–1958 гг. Следует отметить, что в СССР в Московском энергетическом институте под руководством Н. А. Ольшанского и Институте электросварки им. Е. О. Патона под руководством Б. А. Мовчана независимо от работ иностранных ученых в те же годы также были проведены исследования по применению электронно-лучевой сварки.

Сущность электронно-лучевой сварки заключается в использовании тепла, которое выделяется при торможении остросфокусированного ускоренного потока электронов, обладающих высокой кинетической энергией. Для уменьшения потери этой кинетической энергии из-за соударения электронов с молекулами газов воздуха, а также для химической и тепловой защиты процесса создают вакуум ( $10^{-4} \dots 10^{-6}$  мм рт. ст.). При соударении электронного потока с твердым телом более 99 % кинетической энергии электронов переходит в тепловую, расходуемую на нагрев этого тела. Мощность нагрева при электронно-лучевой сварке составляет 1,5...100 кВт, температура в месте соударения — 5 000...6 000 °С, КПД процесса — 85...90 %.

Для электронно-лучевой сварки используют электронную пушку (рис. 3.46). *Электронная пушка* предназначена для создания электронного луча, который и служит источником сварочной теплоты. Параметры электронного луча, соответствующие технологическому процессу сварки, определяют основные требования к конструкции электронной пушки. В сварочных установках электронная пушка состоит из следующих основных элементов: катода 1, фокусирующего прикатодного электрода 2, анода 3, фокусирующей магнитной линзы 4 и отклоняющей магнитной системы 5.

В электронной пушке электроны, испускаемые катодом 1, изготовленным из

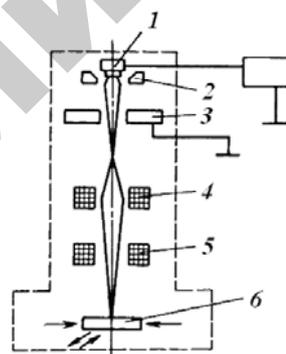


Рис. 3.46. Схема установки для электронно-лучевой сварки

тугоплавких металлов (тантал, вольфрам), формируются в пучок прикатодным электродом 2, ускоряются под действием разности потенциалов между катодом и анодом 3, составляющей 20...150 кВ и выше. Затем электроны фокусируются в виде луча с помощью магнитной линзы 4, представляющей собой катушку с током, ось которой совпадает с осью луча, и направляются специальной отклоняющей магнитной системой 5 на обрабатываемое изделие 6. При перемещении свариваемых заготовок под неподвижным лучом образуется сварной шов.

Основными параметрами режимов электронно-лучевой сварки являются: сила тока в луче (40...500 мА), ускоряющее напряжение (18...20 кВ), скорость перемещения луча по поверхности изделия (20...70 м/ч), продолжительность импульсов и пауз, точность фокусировки луча и степень вакуумизации. Режим и интенсивность нагрева можно точно регулировать изменениями силы тока электронного луча, напряжения, фокусировки и времени. Управляемость процесса нагрева электронным лучом не имеет равных — интенсивность нагрева можно регулировать в пределах от  $10^2$  до  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Первая цифра соответствует интенсивности нагрева газовой горелкой, вторая — сфокусированному лазерному излучению.

Широкий диапазон интенсивности электронно-лучевого нагрева позволяет использовать его для самых разнообразных процессов: термической обработки, пайки, сварки, резки. Электронно-лучевую сварку обычно выполняют при интенсивности нагрева порядка  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, что обеспечивает глубокое проплавление металла. На рисунке 3.47 показано строение сварного шва при сварке деталей толщиной 150 мм, полученного электронным лучом за один проход (однослойный шов) и двухсторонней сваркой под слоем флюса (многослойный шов из 157 слоев).

Технологические особенности электронно-лучевой сварки (высокая интенсивность нагре-

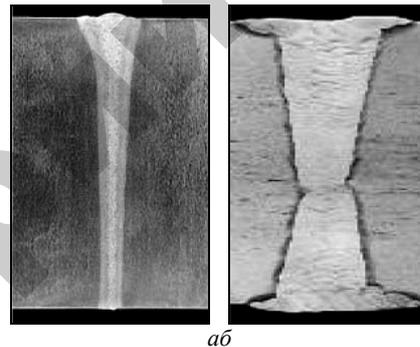


Рис. 3.47. Строение шва, полученного:  
а — электронным лучом (1 слой);  
б — сваркой под слоем флюса (157 слоев)

ва и осуществление ее в вакууме) определяют *преимущества* этого процесса.

**Интенсивный точечный нагрев** при электронно-лучевой сварке приводит к следующему:

1) глубокому быстрому проплавлению металла, что позволяет за один проход сваривать детали толщиной от десятых долей миллиметра до 200 миллиметров, получать швы, в которых отношение глубины провара к его ширине составляет 20:1 и более;

2) быстрому затвердеванию металла, что позволяет получать шов с мелкозернистой структурой и высокими механическими свойствами;

3) уменьшению или практически отсутствию зоны термического влияния, что снижает вероятность рекристаллизации основного металла и деформации сварного соединения и позволяет сваривать детали из сталей с ограниченной и плохой свариваемостью, а также закаленные изделия без ухудшения свойств околошовной зоны;

4) снижению количества теплоты (по сравнению с дуговой сваркой) в 4...5 раз при получении равной глубины проплавления, что позволяет снизить коробление изделия.

Осуществление электронно-лучевой сварки **в вакууме** способствует:

1) химической чистоте металла в зоне сварки, обеспечивающей отсутствие насыщения расплавленного и нагретого металла газами, что позволяет сваривать детали из химически активных (медных, никелевых, алюминиевых), а также тугоплавких (титановых, танталовых, вольфрамовых, ниобиевых, циркониевых, молибденовых и т. п.) металлов и их сплавов;

2) дегазации металла шва, что обеспечивает повышение его пластических свойств и получение высококачественных сварных соединений с зеркально-чистой поверхностью.

*Недостатками* электронно-лучевой сварки являются следующие:

1) сложность и дороговизна установки, особенно с большими вакуумными камерами;

2) дополнительные затраты времени для создания вакуума в рабочей камере после загрузки изделий;

3) необходимость защиты персонала от мощного потока рентгеновского излучения, возникающего при работе установки.

Регулирование мощности и фокусировки электронного луча при электронно-лучевой сварке позволяет использовать его для сварки

изделий практически из любых сплавов: различных сталей, тугоплавких и цветных металлов и их сплавов при толщине стенок конструкции от долей миллиметра (0,02 мм) в электронике и до 150 мм и более в машиностроении. Так, толщина свариваемых изделий может составлять от 0,5...1 мм (вольфрам, молибден, тантал) до 35 мм (сталь), а ширина шва — от 1...1,5 мм (вольфрам, молибден, тантал) до 2...7 мм (сталь).

Электронно-лучевая сварка нашла широкое применение в машиностроении, железнодорожной технике, авиации и космонавтике, а также при производстве ремонтных работ (рис. 3.48).

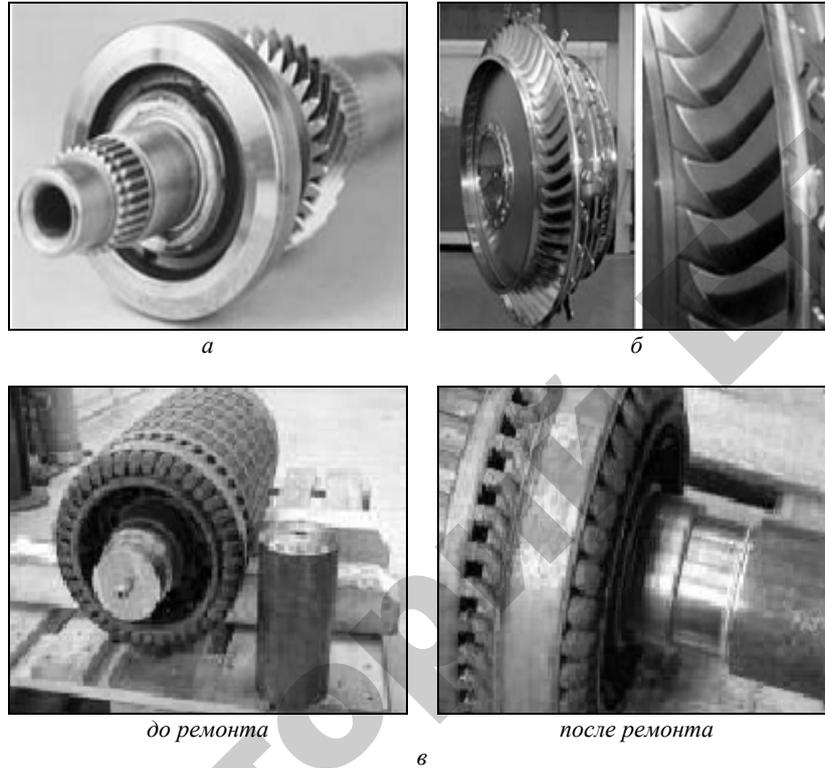


Рис. 3.48. Примеры применения электронно-лучевой сварки:  
*а* — соединение вала с шестерней (глубина шва 35 мм); *б* — корпус подшипника реактивного двигателя, состоящий из множества деталей; *в* — ремонт вала ротора электродвигателя

**Лазерная сварка** — сварка плавлением, при которой для нагрева используется энергия излучения лазера.

Термин «лазер» происходит от первых букв английской фразы «Light amplification by the stimulated emission of radiation», что переводится как «Усиление света посредством индуцирования эмиссии излучения». В 1964 г. за теоретическое обоснование и разработку лазеров Н. Г. Басов, А. М. Прохоров (СССР) и Ч. Таунсом (США) были удостоены Нобелевской премии.

Сущность лазерной сварки заключается в нагреве свариваемых деталей лазерным лучом, представляющим собой вынужденное монохроматическое излучение, длина волны которого зависит от природы рабочего тела лазера-излучателя и может колебаться в диапазоне 0,1...1 000 мкм. Излучение возникает в результате вынужденных скачкообразных переходов возбужденных атомов рабочего тела лазера на более низкие энергетические уровни. При этом возбужденный атом отдает энергию в виде фотонов с частотой, свойственной материалу применяемого рабочего тела. Интенсивность нагрева металла сфокусированным лазерным лучом может достигать  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, что достаточно для мгновенного испарения металла.

Основными элементами лазера (рис. 3.49) являются активная среда, генератор накачки и оптическая система.

По *активным средам* для сварки металлов различают твердотельные и газовые лазеры, которые могут быть как периодического (импульсного) действия, так и непрерывного. В твердотельных лазерах в качестве активной среды применяют, например, стержни из розового рубина — окиси алюминия  $Al_2O_3$  с примесью ионов хрома  $Cr^{3+}$  (до 0,05 %), а в газовых — трубка, заполненная газом  $CO_2$  (иногда с добавлением аргона, азота или гелия).

В качестве *генераторов накачки* для возбуждения атомов активной среды используют различные источ-

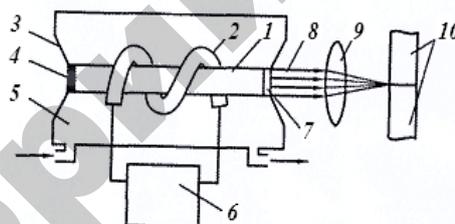


Рис. 3.49. Схема лазера: 1 — активная среда; 2 — генератор накачки; 3 — отражатель; 4 — непрозрачное зеркало; 5 — охлаждающая среда; 6 — источник питания; 7 — полупрозрачное зеркало; 8 — световой луч; 9 — фокусирующая линза; 10 — обрабатываемые детали

ники энергии (световой, электрической, химической и др.). Для твердотельных лазеров в этих целях используют мощные вспышки света, генерируемые лампами накачки. При облучении ионы хрома переходят в другое энергетическое состояние — возбуждаются и затем отдают запасенную энергию в виде квантов света. Для газовых лазеров используют разрядную камеру с тлеющим электрическим разрядом, в которой происходит возбуждение молекул  $\text{CO}_2$ . Возвращаясь в стабильное состояние, эти молекулы образуют кванты света.

На торцах активной среды нанесен слой отражающего вещества (например, серебра) так, что с одного конца образовано непрозрачное 4, а с другого — полупрозрачное 7 зеркала. Излучаемые кванты света, отражаясь от этих зеркал, циркулируют параллельно оптической оси активной среды, возбуждая новые ионы хрома или газовые молекулы  $\text{CO}_2$ , т. е. происходит лавинообразный процесс накачки. В результате этого выделяется лучистая энергия, которая излучается параллельным пучком через полупрозрачное зеркало и фокусируется линзой 9 в месте сварки. Непрозрачное, полупрозрачное зеркала и фокусирующая линза образуют *оптическую систему* лазера.

Мощность твердотельных лазеров, работающих в непрерывном режиме, не превышает 250...500 Вт, а в импульсно-периодическом или импульсном — до 300 Вт. При этом энергия одиночного импульса может достигать 100 Дж и более, что обеспечивает интенсивность нагрева в фокусе свыше  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>.

Существенным недостатком твердотельного лазера является низкий КПД (2...5%). Промышленные сварочные установки с твердотельными лазерами позволяют производить сварку со скоростью до 5 мм/с при частоте импульсов до 20 Гц. Сварку можно осуществлять с применением присадочного материала в виде проволоки диаметром менее 1,5 мм, ленты или порошка. Легирующие элементы при лазерной сварке также можно предварительно наносить на поверхности свариваемых кромок напылением, обмазкой, электроискровым способом и т. п.

Более высоким КПД (до 45%) и мощностью до 20 кВт обладают газовые лазеры, которые могут работать в импульсном и непрерывном режимах.

Лазерную сварку производят на воздухе или в среде защитных газов (аргона, углекислого газа).

Основными энергетическими характеристиками лазерного излучения являются интенсивность нагрева и длительность его действия. На практике сварку ведут при интенсивности нагрева, равной  $10^6 \dots 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

Лазерная сварка (как и электронно-лучевая) благодаря высокой интенсивности нагрева обладает рядом *преимуществ* по сравнению с другими способами сварки. Она позволяет:

1) за один проход сваривать детали толщиной от нескольких микрометров до десятков миллиметров;

2) получать шов с мелкозернистой структурой и высокими механическими свойствами;

3) сваривать изделия из различных металлов и сплавов с ограниченной и плохой свариваемостью за счет уменьшения или практического отсутствия зоны термического влияния;

4) снизить сварочные напряжения и деформации и, как следствие, вероятность образования горячих и холодных трещин и коробления изделия.

По сравнению с электронно-лучевой лазерная сварка обладает следующими *преимуществами*:

1) отсутствие рентгеновского излучения и необходимости в использовании вакуумных камер;

2) отсутствие магнитных полей в процессе сварки, что позволяет соединять магнитные материалы;

3) управление лазерным лучом с помощью зеркал и волоконной оптики, что позволяет осуществлять сварку в труднодоступных, иногда не находящихся в пределах прямой видимости местах, а также в любом пространственном положении;

4) возможность сварки одновременно нескольких деталей от одного лазера расщепленным с помощью призм лучом.

*Недостатками* лазерной сварки являются следующие:

1) сложность и высокая стоимость оборудования;

2) низкий КПД лазеров.

В настоящее время лазерная сварка применяется при соединении деталей из сталей, алюминиевых, магниевых и титановых сплавов. Кроме того, ее применяют при сварке изделий из стекла, полимеров и других неметаллических материалов.

Лазерная сварка широко применяется в микроэлектронике, машиностроении, автомобильной промышленности, авиастроении, судостроении (рис. 3.50).



*Рис. 3.50.* Примеры применения лазерной сварки: *а* — приварка сифлона к трубопроводам; *б* — сварка чугуновой гидравлической части насоса с рабочим колесом из коррозионно-стойкой стали; *в* — сварка корпуса из коррозионно-стойкой стали устройства для магнитной обработки воды с постоянным магнитом; *г* — приварка алмазосодержащих сегментов к корпусу дисковой пилы; *д* — сварка сотовой панели; *е* — сварка тонкостенных конструкций; *ж* — сварка пластинчатого теплообменника; *з* — сварка биметаллической втулки из нержавеющей стали *1* и меди *2*

Широкое применение лазерной сварки сдерживается тем, что стоимость технологических лазеров пока еще высока. Ее используют тогда, когда применение традиционных способов невозможно или нецелесообразно. К таким случаям относится и необходимость получения прецизионной (высокоточной) конструкции, форма и размеры которой не должны меняться в результате сварки. Лазерная сварка применяется тогда, когда она позволяет значительно упростить технологию изготовления сварных изделий, т. е. является заключительной операцией (без последующей правки или механической обработки). Экономически эффективна лазерная сварка и тогда, когда необходимо существенно повысить производительность труда, поскольку ее скорость может в несколько раз превосходить скорость сварки, осуществляемой традиционными способами. Лазерная сварка является единственным процессом, обеспечивающим качественные сварные соединения при изготовлении крупногабаритных конструкций малой жесткости или с труднодоступными швами, а также при необходимости соединения деталей из трудно свариваемых, в том числе разнородных материалов.

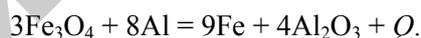
**Термитная сварка** — сварка, при которой для нагрева используется энергия горения термитной смеси.

В 1859 г. русский ученый Н. Н. Бекетов впервые описал алюминотермитную реакцию. Поскольку реакция проходит с выделением большого количества теплоты, ее назвали термитной.

Основоположником термитной сварки является представитель немецкой школы химиков Г. Гольдшмидт, осуществивший в 1898 г. соединение двух железных брусков с помощью этой сварки.

**Термитная смесь (термит)** (от греч. *therme* — жар, тепло) — порошкообразная смесь оксидов различных металлов (обычно железа) с чистыми металлами (алюминий, реже магний), которые могут восстанавливать эти оксиды.

Наиболее распространенным термитом является смесь порошков оксидов железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  с алюминием (20...25 % алюминиевого порошка и 75...80 % оксида железа). Если нагреть данную смесь до температуры 1 300 °С, то начинается реакция восстановления этих оксидов:



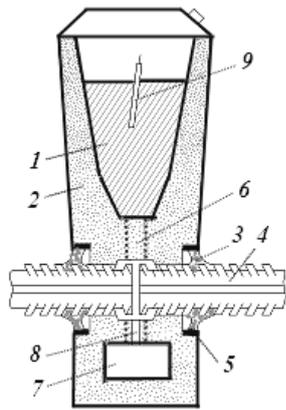


Рис. 3.51. Схема термитной сварки: 1 — термитная смесь; 2 — тигель; 3 — обмазка из огнеупорной глины; 4 — свариваемое изделие; 5 — асбестовое уплотнение; 6 — обводной канал; 7 — полость; 8 — основной канал; 9 — запал

тигля термитной смесью 1 и зажигают ее с помощью запала 9. Жидкий металл, образовавшийся в результате горения термита, стекает по обводному каналу 6 и заполняет полость 7, предварительно подогревая свариваемый металл. После заполнения полости 7, жидкий металл по основному каналу 8 попадает в зазор между соединяемыми деталями 4 и, сплавляясь с основным металлом, образует сварное соединение.

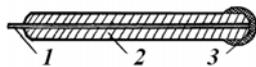


Рис. 3.52. Термитный карандаш: 1 — проволока; 2 — термит; 3 — затравка

В настоящее время для такой сварки промышленностью выпускаются специальные термитные спички и карандаши (рис. 3.52). Карандаш представляет собой отрезок сварочной проволоки, диаметр которой, как и при электродуговой сварке, зависит от толщины свариваемых деталей. На проволоку нанесен термит, круто замешанный на нитроцеллюлозном клее. Конец термитного карандаша обмазан затравкой, которая предназначена для поджигания карандаша. Во время сварки термитный карандаш вставляют в специальный держатель. Среднее время горения термитного ка-

Выделяющиеся при этом тепло нагревает продукты реакции до температуры 3 000 °С. При этом оксид алюминия всплывает в виде шлака, а жидкое железо заполняет зазор между деталями и, кристаллизуясь, образует сварное соединение. Обычно из одного килограмма термитной смеси образуется 550 г расплавленного металла и 450 г шлака. Для улучшения механических свойств в термиты можно вводить легирующие элементы и для увеличения выхода жидких продуктов реакции — металлический наполнитель (стальную обечку).

На практике для осуществления термитной сварки (рис. 3.51) соединяемые детали 4 помещают в специальный тигель 2 из огнеупорного материала. Заполняют верхнюю часть

тигля термитной смесью 1 и зажигают ее с помощью запала 9. Жидкий металл, образовавшийся в результате горения термита, стекает по обводному каналу 6 и заполняет полость 7, предварительно подогревая свариваемый металл. После заполнения полости 7, жидкий металл по основному каналу 8 попадает в зазор между соединяемыми деталями 4 и, сплавляясь с основным металлом, образует сварное соединение.

В настоящее время для такой сварки промышленностью выпускаются специальные термитные спички и карандаши (рис. 3.52). Карандаш представляет собой отрезок сварочной проволоки, диаметр которой, как и при электродуговой сварке, зависит от толщины свариваемых деталей. На проволоку нанесен термит, круто замешанный на нитроцеллюлозном клее. Конец термитного карандаша обмазан затравкой, которая предназначена для поджигания карандаша. Во время сварки термитный карандаш вставляют в специальный держатель. Среднее время горения термитного ка-

рандаша составляет 20 с, температура во время его горения — 2 200...2 800 °С, а получаемая длина сварного шва — 80...150 мм.

Сварочные карандаши используют для сварки горизонтальных, вертикальных и нижних швов (кроме потолочных) в деталях из малоуглеродистых и нержавеющей сталей, меди, бронзы.

*Преимуществами* термитной сварки являются следующие:

- 1) простота и экономичность технологического процесса;
- 2) компактность и мобильность оборудования и приспособлений;
- 3) возможность сварки крупногабаритных изделий;
- 4) возможность выполнения работ в труднодоступных местах и в полевых условиях.

*Недостатками* термитной сварки являются следующие:

- 1) пожароопасность процесса;
- 2) необходимость создания специальных условий для хранения термитных смесей, карандашей и спичек;
- 3) большой объем подготовительных и вспомогательных работ (формовка, подогрев, обрубка прибылей и т. д.) и невозможность текущего контроля хода процесса.

Термитную сварку применяют для соединения рельсов (рис. 3.53), стыков арматуры, проводов (рис. 3.54), линий связи и электропередач. Ее можно использовать для ремонта крупных стальных и чугунных деталей в судостроении (валы, гребные винты, якоря) и машиностроении (крупные шестерни, рамы, фундаменты, ступицы). При этом сварка термитом на основе алюминия применяется для соединения стальных и чугунных деталей, а термитом на основе магния — для соединения стальных проводов и труб небольшого диаметра (в основном).

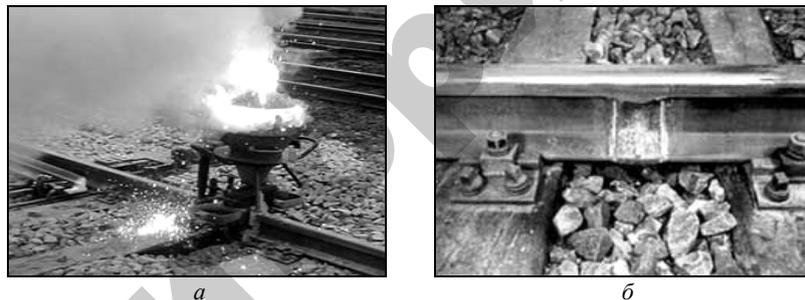


Рис. 3.53. Термитная сварка рельсов: *а* — процесс сварки; *б* — сварное соединение

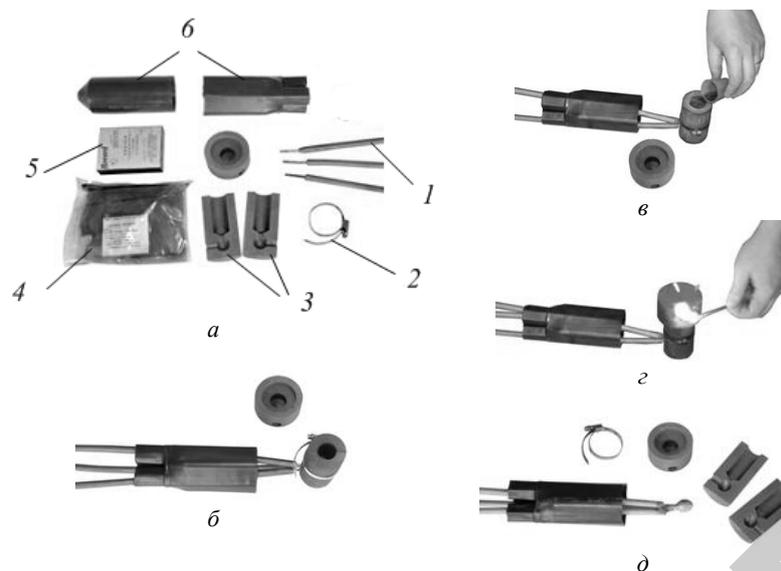


Рис. 3.54. Технологический процесс термитной сварки проводов: *a* — подготовка исходных материалов; *б* — сборка оснастки; *в* — засыпка термитной смеси; *з* — поджигание термитной смеси; *д* — разборка оснастки, получение соединения; 1 — провода; 2 — хомут; 3 — тигель-форма; 4 — термитная смесь; 5 — термитные спички; б — термоусаживаемые муфты

**Холодная сварка** — сварка давлением при значительной пластической деформации зоны соединения без нагрева свариваемых частей внешними источниками тепла.

Первый известный случай холодной сварки давлением датируется 700 г. до н. э. (поздний бронзовый век, Британия). Используемым металлом было золото, а сваренные данным способом золотые шкатулки были найдены во время археологических раскопок.

Первым научным экспериментом с использованием холодной сварки является опыт, продемонстрированный 29 апреля 1724 года Ж. И. Деагюлье в Королевском научном обществе (Англия). Два свинцовых шара (первый из которых весил 1 фунт, а второй — 2 фунта), с которых были срезаны шаровые сегменты по 3/4 дюйма, были руками спрессованы с одновременным скручиванием. Оказалось, что в результате они соединились. Шары пристали друг к другу так прочно, что поддерживаемый рукой верхний однофунтовый шар отсоединялся от нижнего лишь при нагрузке более 16 фунтов. При осмотре соприкасающихся поверхностей оказалось, что

фактическая площадь их сварного соединения не превышала площади круга диаметром в 1/10 дюйма.

На практике этот метод сварки был использован во время Второй мировой войны в Германии для соединения деталей из алюминиевых сплавов при изготовлении авиационных двигателей. В СССР пионерами внедрения холодной сварки были К. К. Хренов (Киев, Институт сварки им. О. Е. Патона) и И. Б. Баранов (Ленинград, завод «Электрик»), а затем ВНИИЭСО (ныне Институт сварки России).

Холодная сварка является сложным физико-химическим процессом, протекающим только при интенсивной пластической деформации в зоне соединения. Роль деформации при холодной сварке заключается в разрушении оксидных пленок, вытеснении их из зоны соединения и сближении свариваемых поверхностей на межатомное расстояние. Необходимое для сварки давление составляет, например, для изделий из меди 2 000 МПа, а из отожженного алюминия — 300...600 МПа.

Качество сварного соединения определяется исходным физико-химическим состоянием контактных поверхностей, давлением (усилием сжатия) и степенью их деформации при сварке. Качество соединения также зависит от схемы деформации и способа приложения давления (статического, вибрационного). В зависимости от схемы пластической деформации заготовок сварка может быть точечной, шовной и стыковой.

**Точечной** холодной сваркой является сварка отдельными точками.

При этой сварке (рис. 3.55, а) зачищенные детали 1 устанавливают внахлестку между пуансонами 2, имеющими рабочую часть 3 и опорную поверхность 4. При вдавливании пуансонов, форма которых может быть различной (рис. 3.55, б), сжимающим усилием  $P$  происходит деформация отдельных участков заготовок и образование на этих участках сварного

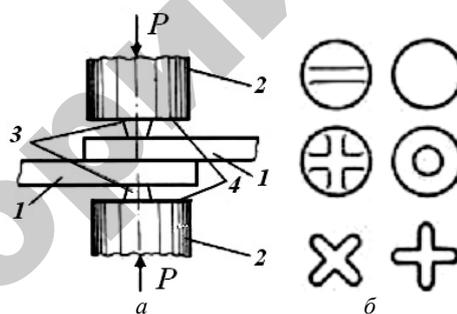


Рис. 3.55. Холодная точечная сварка: а — схема процесса; б — формы рабочих поверхностей пуансонов

соединения. Опорная поверхность пуансонов создает дополнительное напряженное состояние в конечный момент сварки, ограничивает глубину погружения пуансонов в металл и уменьшает коробление изделия.

Холодную сварку успешно выполняют на самых различных серийных прессах с применением кондукторов, надежно фиксирующих свариваемые заготовки, чтобы исключить их коробление.

Точечную холодную сварку применяют для соединения изделий из алюминия, алюминия и меди, а также армирования алюминия медью. Этой сваркой можно заменить трудоемкую клепку и контактную точечную сварку. Точечной холодной сваркой сваривают внахлестку листы толщиной 0,2...15 мм, сжимая их круглыми или прямоугольными пуансонами. Для получения сварной точки пуансон вдавливают на глубину 0,7...0,9 толщины свариваемых деталей.

**Шовная** холодная сварка характеризуется непрерывностью сварного соединения. При шовной холодной сварке (рис. 3.56) собранные внахлестку заготовки 1 устанавливаются между роликами 2 и сжимаются ими до полного погружения рабочих выступов роликов 3 в металл. Ролики приводят во вращение. Перемещая изделие и последовательно внедряясь в него рабочими выступами, ролики вызывают интенсивную деформацию металла, в результате которой образуется непрерывное сварное соединение (шов).

Шовная холодная сварка бывает двусторонняя, односторонняя и несимметричная. Двусторонняя сварка выполняется одинаковыми

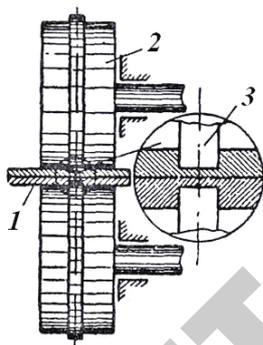


Рис. 3.56. Схема холодной шовной сварки: 1 — детали; 2 — ролики; 3 — выступы

роликами. При односторонней сварке один ролик имеет выступ, высота которого равна сумме выступов при двусторонней сварке, а второй ролик является опорным и не имеет рабочего выступа. При несимметричной сварке ролики имеют различные по размерам (иногда и по форме) рабочие выступы.

Односторонняя шовная холодная сварка обычно применяется для сварки деталей из разнородных металлов, отличающихся твердостью. Рабочая часть ролика вдавливается в более твердый металл. Такая сварка при прочих равных

условиях обеспечивает более прочные швы и при сварке деталей из однородных металлов.

При шовной холодной сварке металл свободно течет вдоль оси шва, что затрудняет создание достаточного напряженного состояния металла в зоне соединения. Поэтому для достижения провара требуется бóльшая пластическая деформация (на 2...6 %), чем при точечной холодной сварке. Степень пластической деформации в зоне сварки можно повысить, увеличивая диаметры роликов. Для этого диаметр ролика выбирают равным  $50h$ , где  $h$  — толщина свариваемых изделий с шириной рабочего выступа, равной  $(1...1,5)h$ , высотой —  $(0,8...0,9)h$ . При этом ширина опорной части ролика, ограничивающая деформации, в 2...3 раза больше ширины рабочего выступа. Шовная холодная сварка изделий из алюминия толщиной 1,0 мм выполняется со скоростью 8...12 м/мин.

Для осуществления шовной холодной сварки применяются металлорежущие станки (например, фрезерные), при сварке изделий из тонких пластичных металлов — ручные настольные станки.

Холодной **стыковой** сваркой является сварка, осуществляемая по всей поверхности касания свариваемых деталей.

Одна из схем холодной стыковой сварки, разработанная в Институте сварки им. О. Е. Патона, представлена на рисунке 3.57. В корпусе 1 имеются гнездо для конусного зажима 2 и направляющие для подвижного ползуна 3, в котором также расположен конусный зажим 4. После предварительной зачистки торцов заготовок 5, их устанавливают в зажимы 2, 4, которые имеют формирующие части с режущими кромками 6, упорами 7 и углублениями 8. Осадочное усилие  $P$  прикладывается к ползуну 3. При его перемещении с помощью конусов зажимаются поверхности свариваемых заготовок и сдавливаются их торцы. В процессе осадки в результате пластической деформации углубления 8 заполняются металлом, вытекающим из зоны соприкосновения свариваемых поверхностей. Когда упоры 7

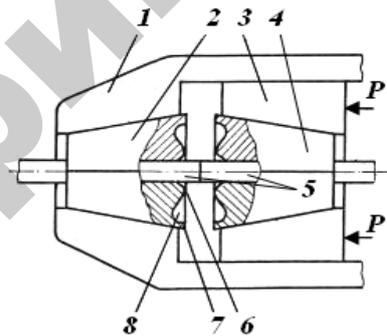


Рис. 3.57. Схема холодной стыковой сварки

приходят в соприкосновение, в зоне стыка происходит образование сварного соединения, а металл, заполнивший углубления  $\delta$ , отрезается кромками  $\delta$ .

*Преимуществами холодной сварки являются следующие:*

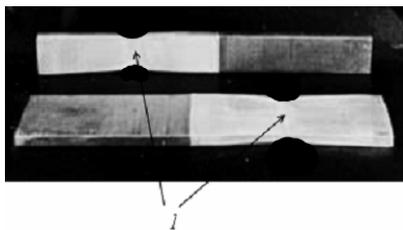


Рис. 3.58. Образец стыковой сварки после испытания на растяжение:  
1 — место начала разрыва

1) упрочнение металла в процессе пластического деформирования (наклеп), что позволяет получать сварное соединение по прочности превосходящее основной материал (рис. 3.58);

2) отсутствие нагрева соединяемых заготовок, что позволяет соединять термически разупрочняемые металлы без снижения их механических свойств

вблизи зоны сварного шва, разнородные металлы (например, медь с алюминием) без образования в стыке хрупких интерметаллических соединений, сваривать электрические провода, имеющие изоляционные покрытия, а также вести процесс сварки в огне- и взрывоопасной среде, герметизировать корпуса приборов, банки, контейнеры, ампулы и другие емкости, нагрев которых недопустим;

3) экологичность процесса, связанная с отсутствием светового излучения, шума, газовых выделений, брызг расплавленного металла и т. п.;

4) экономичность процесса сварки, связанная с отсутствием необходимости применения расходных материалов (флюсов, припоев, присадочных материалов, защитных газов);

5) простота процесса и возможность его механизации и автоматизации.

*К недостаткам холодной сварки можно отнести следующие:*

1) ограниченность применения некоторых металлов (не поддаются сварке практически все черные металлы, а также ряд малопластичных цветных металлов и сплавов, например, бронза);

2) ограничение свариваемых деталей по форме и размерам (невозможность сварки мелких деталей и деталей сложной формы);

3) отсутствие универсального оборудования и оснастки (замена одних деталей, подлежащих холодной сварке, другими требует, как правило, переналадки оборудования и замены оснастки);

4) наличие вмятин при соединении деталей внахлестку (при точечной или шовной холодной сварке).

Холодную сварку применяют в производстве (крупносерийном или массовом) однотипных деталей из алюминия, меди, свинца, цинка, никеля, серебра, кадмия, железа (рис. 3.59).



Рис. 3.59. Примеры применения холодной сварки: *a* — армирование медью выводов алюминиевых обмоток трансформаторов; *б* — герметизация корпусов полупроводниковых приборов и других замкнутых емкостей; *в* — приварка медных контактных пластин к алюминиевым катодным штангам; *г* — медные уплотнительные кольца для гидросистем машин и механизмов; *д* — соединение медных контактных (троллейных) проводов; *е* — присоединение ручек к различным емкостям

В частности, холодная сварка применяется:

– в электротехнике (для соединения алюминиевых деталей с медными при изготовлении обмоток электрических машин и трансформаторов (рис. 3.59, *a*), коллекторных пластин электрических двигателей и др.);

– в радиотехнике и радиоэлектронике (для герметизации корпусов полупроводниковых приборов из цветных металлов и сплавов: меди, алюминия, кобальта (рис. 3.59, *б*), для герметичной заделки

штенгелей (трубок-отводов), через которые производится откачка воздуха из сосудов для получения вакуума);

– в цветной металлургии (для приварки медных контактных пластин к алюминиевым катодным штангам (рис. 3.59, в) при электролитическом производстве цинка, никеля и других металлов);

– в приборостроении (при изготовлении шасси приборов из алюминия и его сплавов, а также для соединения элементов конструкций и отдельных деталей);

– в машиностроении (при изготовлении медных уплотнительных колец (рис. 3.59, з) для гидросистем машин и механизмов);

– в автомобильной промышленности (при изготовлении радиаторных трубок из деформируемых алюминиевых сплавов);

– на электрифицированном транспорте (железнодорожном, городском и промышленном) для соединения медных контактных (троллейных) проводов (рис. 3.59, д);

– в различных отраслях промышленности (для производства посуды, бачков, молочных фляг (рис. 3.59, е) и других изделий из алюминия).

**Сварка трением** — сварка давлением, при которой нагрев осуществляется трением, вызванным относительным перемещением (вращением) свариваемых частей друг относительно друга.

Изобретателем сварки трением является токарь Эльбрусского рудника (СССР) А. И. Чудиков, который в 1956 г. разработал этот способ сварки.

Проведенные во Всесоюзном научно-исследовательском институте электросварочного оборудования (ныне Институт сварки России) исследования показали, что такие особенности процесса, как низкая энергоемкость, высокие КПД, производительность, качество соединений и относительная простота оборудования, представляют несомненный практический интерес. Изобретение токаря А. И. Чудикова получило поддержку, и ему было выдано авторское свидетельство СССР на этот способ сварки.

Сущность этого метода сварки заключается в том, что механическая энергия, подводимая к одной или обоим свариваемым деталям, в результате трения контактирующих поверхностей преобразуется в тепловую. При этом выделение теплоты происходит непосредственно в зоне их контакта.

Образование прочного соединения происходит в результате возникновения металлических связей между чистыми контакти-

рующими поверхностями. Неровности, различные включения и пленки, препятствующие образованию этих связей, разрушаются при трении и удаляются из зоны сварки в процессе пластической деформации, протекающей в радиальном направлении. Интенсивная очистка поверхности от оксидных и адсорбированных пленок позволяет не только обеспечивать возможность сварки, но и получать высокопрочные соединения.

Основными параметрами режимов сварки трением являются: частота вращения свариваемых деталей, величина осевого усилия сжатия, величина осадки при сжатии, длительность приложения усилия сжатия.

Трение свариваемых поверхностей может осуществляться вращением или возвратно-поступательным перемещением сжатых заготовок (рис. 3.60).

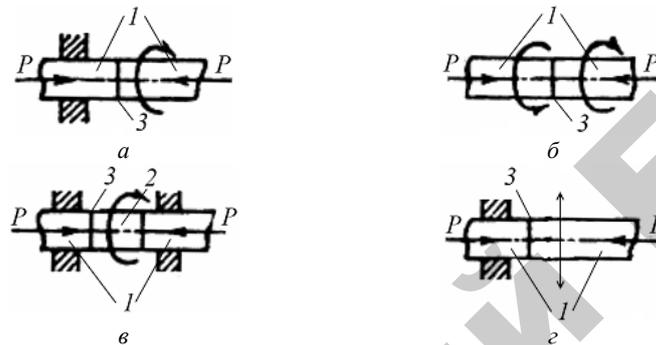


Рис. 3.60. Схемы процесса сварки трением: *а* — с вращением одной детали; *б* — с вращением обеих деталей в противоположном направлении; *в* — неподвижных деталей с вращающейся вставкой; *г* — с возвратно-поступательным движением одной из деталей; *1* — свариваемые детали; *2* — вставка; *3* — зона сварки

Простейшая и наиболее распространенная схема такого процесса представлена на рисунке 3.60, *а*. Вращающуюся и неподвижную детали *1* сжимают осевым усилием *P*. Трущиеся поверхности разогреваются, при этом трение способствует разрушению оксидных пленок на них. Когда наступает разогрев поверхностей свариваемого металла до его пластичного состояния (значения температуры локального разогрева находятся в диапазоне 800...1 300 °С), возни-

кает временный контакт, происходит его разрушение и высокопластичный металл (металл шва) выдавливается из стыка с образованием грата. После этого прекращают вращение, продолжая прикладывать постоянное или возрастающее давление  $P$ , с образованием сварного соединения 3.

*Преимуществами* сварки трением являются следующие:

1) прочность и пластичность зоны сварного соединения не уступает аналогичным характеристикам основного металла, что объясняется высоким качеством сварного соединения, обусловленным локализованным тепловыделением только в контактирующих поверхностных слоях соединяемых деталей (ширина зоны термического влияния составляет не более 2...3 мм);

2) независимость качества сварных соединений от чистоты их поверхности;

3) возможность сварки изделий из разнородных металлов и сплавов, которые не свариваются традиционными способами;

4) высокая производительность (время сварки составляет от нескольких секунд до 0,5 мин);

5) энергетические показатели процесса характеризуются высоким КПД и низким расходом энергии (25...100 Вт/см<sup>2</sup>, что в 5...10 раз меньше, чем при контактной стыковой сварке);

6) экономичность процесса сварки, обусловленная отсутствием расходных материалов (флюсов, припоев, присадочных материалов, защитных газов и т. п.);

7) экологичность процесса, связанная с отсутствием светового излучения, вредных газовых выделений, горячих брызг металла и т. п.

*К недостаткам* сварки трением относятся следующие:

1) возможность соединения только таких деталей, у которых хотя бы одна является телом вращения (круглый стержень или труба), а другая может быть произвольной формы (но должна иметь плоскую поверхность);

2) громоздкость оборудования, в результате чего процесс не может быть мобильным;

3) необходимость удаления грата;

4) искривление волокон текстуры проката в зоне пластического деформирования, что может оказаться очагом последующего усталостного разрушения в деталях, работающих в условиях динамиче-

ских нагрузок, или очагом коррозии в деталях, работающих в агрессивных средах.

Сварка трением в промышленном производстве используется для соединения деталей сечением 50...10 000 мм<sup>2</sup>. Наиболее эффективно применение сварки трением при изготовлении круглых деталей ступенчатого по длине профиля (путем их сварки из заготовок разного диаметра), при изготовлении составных деталей из разных материалов (для экономии более дорогого или дефицитного из них), при изготовлении сварно-штампованных, сварно-кованых и сварно-литых деталей.

Сваркой трением хорошо свариваются изделия из черных металлов (исключением является чугун): малоуглеродистых, среднеуглеродистых, низко- и среднелегированных, а также жаропрочных сталей. Хорошо свариваются детали из этих сталей в различных сочетаниях между собой, а также из быстрорежущих сталей P9 и P18 и из конструкционных сталей 40 и 40X. Хорошо свариваются между собой детали из алюминия, меди, латуни и других цветных металлов, а также из алюминия со всеми своими сплавами, алюминия с медью, меди со сталью, алюминия со сталью. Эффективно применение сварки трением и для соединения пластмассовых заготовок.

Сварка трением широко используется:

- в автомобилестроении (при изготовлении и ремонте деталей рулевого управления, карданных валов легковых и грузовых автомобилей, полуосей, картеров задних мостов автомобилей, клапанов двигателей внутреннего сгорания, цилиндров гидросистем и др.);

- в тракторостроении (для изготовления и ремонта деталей рулевого управления, планетарных передач, валов отбора мощности, катков, траков, роторов турбонагнетателей дизельного двигателя и др.);

- в электропромышленности (для изготовления деталей высоковольтной аппаратуры, выводов бумагомасляных конденсаторов, кислотных аккумуляторов и анодов игнитронов, поршней пневмоцилиндров сварочных машин и др.);

- в инструментальном производстве (при изготовлении фрез, сверл, метчиков и т. п.).

Некоторые примеры применения сварки трением приведены на рисунке 3.61.



*Рис. 3.61.* Применение сварки трением: *а* — гладкие и резьбовые калибры; *б* — сварка труб; *в* — сталеалюминевый трубчатый переходник (диаметр — 90 мм, толщина стенки — 4 мм); *г* — клапан ДВС; *д* — вилка тяги (поковка и прокат); *е* — ротор турбоагнетателя (колесо из жаропрочной аустенитной стали, вал — из перлитной стали); *ж* — соединение пластин линейной сваркой

**Ультразвуковая сварка** — сварка давлением, осуществляемая при воздействии ультразвуковых колебаний.

Ультразвуковые колебания (ультразвук) — это механические колебания в газах, жидкостях и твердых телах с частотой более 20 кГц. Принцип действия устройств для получения ультразвуковых колебаний основан на пьезоэлектрическом эффекте или магнитострикции.

В 1842 г. английский физик Джеймс Джоуль обнаружил, что при перемагничивании электрическим током железных и никелевых стержней они то уменьшаются, то увеличиваются в такт изменениям направления тока. При этом в окружающей среде возбуждаются волны, частота которых зависит от колебаний стержня. Это явление назвали магнитострикцией (от латинского «стриктус» — «сжатие»).

В 1880 г. французские ученые Жак и Пьер Кюри установили, что если кристалл кварца сжать с двух сторон, то на гранях кристалла появляются электрические заряды. Это явление было названо пьезоэлектричеством (от греческого «пъезо» — «давлению»), а материалы с такими свойствами — пьезоэлектриками. Позже это явление объяснили анизотропией кристалла кварца, характеризующей разными физическими свойствами вдоль разных граней, и назвали «пьезоэлектрическим эффектом».

В дальнейшем братья Кюри установили, что пьезоэлектрический эффект обратим и если на гранях кристалла создать разноименные электрические заряды, то он либо сожмется, либо растянется (в зависимости от того, к какой грани приложен положительный заряд, а к какой — отрицательный).

В 1917 г. французский ученый Поль Ланжевен подводя к граням кварцевого кристалла переменный ток высокой частоты обнаружил, что кристалл колеблется в такт изменению частоты тока. Позже П. Ланжевен разработал специальные ультразвуковые излучатели, позволившие значительно увеличить амплитуду этих колебаний.

Изобретение ультразвуковой сварки было осуществлено в 1930–40-е гг. Открытие этого процесса было связано с исследованиями по применению ультразвуковых колебаний для очистки поверхностей, соединяемых с помощью контактной сварки. Было установлено, что при одновременном воздействии на зону сварки определенного усилия сжатия и ультразвуковых колебаний соединение образцов осуществляется без пропускания через них сварочного тока.

Реализация ультразвуковой сварки долгое время сдерживалась отсутствием исследований закономерностей образования сварного соединения и специализированного оборудования. Только в середине 60-х годов XX века исследования, проведенные в Институте электросварки им. Е. О. Патона, ИМЕТ им. А. А. Байкова и ВНИИЭСО, позволили обосновать механизм образования соединения металлов с помощью ультразвука и осуществить этот процесс на практике.

Процесс ультразвуковой сварки основан на одновременном воздействии на свариваемые детали механических колебаний с ультразвуковой частотой (20...40 кГц) и относительно небольших усилий сжатия. Механические колебания вызывают возвратно-поступательное движение сжатых контактирующих поверхностей, а одновременно прикладываемое усилие приводит к возникновению сил трения между соединяемыми частями. В результате трения в тонких поверхностных слоях контактирующих поверхностей создаются сдвиговые деформации, разрушающие поверхностные пленки. Тонкие поверхностные слои металла нагреваются, металл в них размягчается и под действием сжимающего усилия пластически деформируется. При сближении поверхностей на расстояние действия межатомных сил между этими поверхностями возникает прочная связь. Возникающее при этом в зоне соединения небольшое тепловыделение не приводит к изменению структуры, механических и других свойств свариваемых материалов. Например, при сварке деталей из меди температура в зоне контакта не превышает 600 °С, а из алюминия — 200...300 °С. Это особенно важно при сварке химически активных металлов.

Процесс ультразвуковой сварки может также сопровождаться интенсивным протеканием процесса взаимной диффузии в контактирующих поверхностных слоях, а в ряде случаев — плавлением металла на глубину, равную нескольким атомным слоям.

Принцип действия установок для ультразвуковой сварки, как правило, основывается на использовании магнестрикционного эффекта.

Установка для ультразвуковой сварки состоит из магнестрикционного генератора 1, волновода 2 (с закрепленным на его конце сварочным наконечником 3), механизма сжатия 4 и опоры 5 (рис. 3.62).

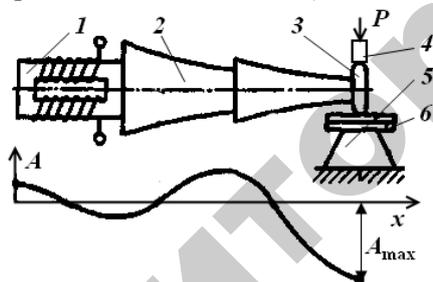


Рис. 3.62. Схема ультразвуковой сварки

Магнестрикционный генератор 1 является источником продольно-упругих механических колебаний. Он изготавливается из пластин толщиной 0,1...0,2 мм, выполненных из магнестрикционных материалов, способных изменять свои геометрические размеры под действием переменного магнит-

ного поля. К таким материалам, называемым магнитоотрицательными, относятся никель, сплавы на основе железа и алюминия (алфер), железа и никеля (пермаллой) и др. Изменения размеров магнитоотрицательных материалов очень незначительны (1...3 мкм), поэтому для увеличения амплитуды колебаний (до 20...30 мкм), а также для передачи механических колебаний к месту сварки используют волновод 2, как правило, сужающейся формы. Волновод соединяется с магнитоотрицательным генератором припоем или клеем. Его размеры и форма подбираются так, чтобы в зоне сварки амплитуды колебаний были максимальными (кривая упругих колебаний представлена на рисунке 3.62). Сварочный наконечник 3 является согласующим звеном между механизмом сжатия 4 и волноводом 2.

Питание магнитоотрицательного генератора осуществляется от источника электрической энергии (генератора с частотой колебаний тока 18...30 кГц и выходной мощностью 0,01...10 кВт). Свариваемые детали 6 устанавливаются на опоре 5 и с помощью механизма сжатия 4 прижимаются к ней концом сварочного наконечника 3 с заданным усилием  $P$ , направленным перпендикулярно к свариваемым поверхностям. При включении магнитоотрицательного генератора 1 механические колебания волновода 2 передаются через сварочный наконечник 3 на свариваемые детали 6. В зависимости от формы сварочного наконечника можно получать точечные и шовные соединения внахлестку, а также соединения по замкнутому контуру.

Основными параметрами ультразвуковой сварки металлических изделий являются: амплитуда механических колебаний (20...30 мкм), усилие сжатия (20...4 500 Н), время сварки (0,2...4 с), скорость сварки (0,5...20 м/мин — для шовной).

*Преимуществами* ультразвуковой сварки являются следующие:

1) возможность получения сварного соединения из разнотолщинных однородных и разнородных металлов без их расплавления, а также пластмасс;

2) возможность образования сварного соединения без предварительной подготовки свариваемых поверхностей (оксидные пленки, механические загрязнения, масла, жиры, эмульсии, пыль удаляются из зоны сварки колебаниями материала);

3) возможность осуществления процесса при низких температурах, что обеспечивает отсутствие зоны термического влияния и экологическую чистоту процесса;

- 4) возможность получения сварного шва, прочность которого составляет более 70 % от прочности исходного материала;
- 5) малое время рабочего цикла процесса сварки (0,1...5,0 с);
- 6) возможность контроля всех параметров сварки (частота генератора, усилие сжатия, время и скорость сварки);
- 7) простота механизации и автоматизации процесса.

*Недостатками* ультразвуковой сварки являются следующие:

- 1) возможность сварки металлических изделий толщиной порядка 1 мм (для очень пластичных металлов (медь и алюминий) — не более 3 мм);
- 2) высокая стоимость сварочного оборудования;
- 3) наличие вредного воздействия ультразвука на организм человека.

Ультразвуковая сварка используется для соединения тонких металлических изделий. Она позволяет сваривать заготовки толщиной 0,005...3,0 мм или диаметром 0,01...0,5 мм, а при их приварке к деталям толщина последних практически не ограничивается.

Метод ультразвуковой сварки позволяет соединять детали из разнородных металлов и сплавов (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Свариваемость различных металлов ультразвуковой сваркой

Металл	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1. Алюминий	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2. Латунь		+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-
3. Медь			+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-
4. Золото				+	-	-	+	+	-	-	+	-	-
5. Магний					+	-	-	-	-	-	-	-	+
6. Молибден						+	+	+	-	-	+	+	+
7. Никель							+	+	-	+	+	+	-
8. Платина								+	-	-	+	-	-
9. Серебро									+	-	+	-	+
10. Нержавеющая сталь										+	-	-	-
11. Сталь											+	+	+
12. Титан												+	-
13. Вольфрам													+

*Примечание:* + — сварка возможна; - — сварка невозможна.

Ультразвуковая сварка применяется:

– в электронной и электротехнической промышленности (изготовление полупроводниковых приборов, алюминиевых электролитических конденсаторов, трансформаторов, предохранителей, реле, нагревателей бытовых холодильников, приборов точной механики и оптики и т. п.);

– в автомобильной промышленности (изготовление радиаторов);

– в легкой промышленности (изготовление игрушек, тары, изготовленной из фольги, и т. п.);

– в металлургии (при сращивании концов рулонов различных тонколистовых материалов (медь, алюминий, никель и их сплавы), при их получении или обработке).

Примеры использования ультразвуковой сварки представлены на рисунке 3.63.

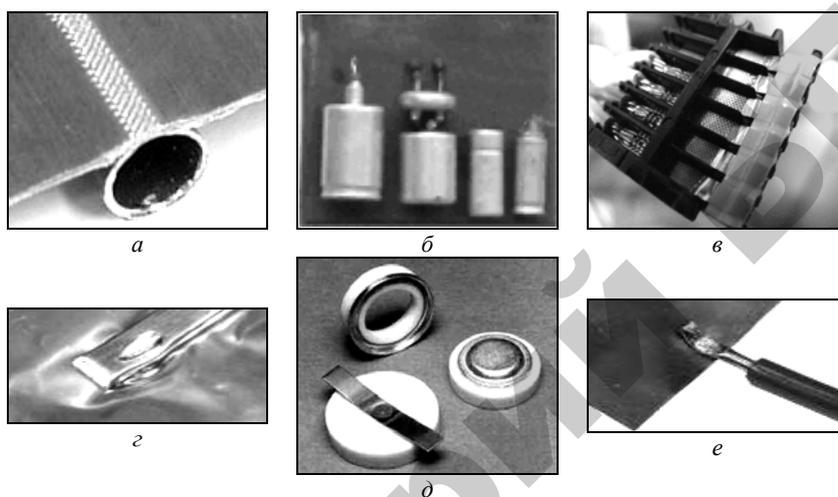


Рис. 3.63. Использование ультразвуковой сварки: *a* — фрагмент радиатора солнечного коллектора; *б* — конденсаторы; *в* — разъем электротехнического контакта; *г* — соединение медной шины толщиной 2 мм с листовым серебром толщиной 0,15 мм; *д* — соединение керамики  $Al_2O_3$  с алюминием; *е* — соединение медного провода сечением  $1,5 \text{ мм}^2$  с листовой сталью толщиной 0,5 мм

**Диффузионная сварка** — сварка давлением, осуществляемая за счет взаимной диффузии атомов в тонких поверхностных слоях контактирующих частей.

Способ диффузионной сварки был создан на этапе активного развития авиационной и космической техники, когда возникла необходимость в новых конструкционных материалах и создании из них сложных изделий. Этот способ впервые был предложен в 1956 г. советским изобретателем и ученым Н. Ф. Казаковым, а в 1959 г. внедрен в производство. На этот новый способ соединения материалов были получены патенты в ведущих западных странах (Великобритания, Франция, Япония, Швеция, Бельгия, ФРГ и США).

Диффузионная сварка является способом, осуществляемым в защитной среде (вакууме или инертных газах) без расплавления основного металла за счет одновременного нагрева (до сравнительно высоких температур) и сдавливания соединяемых деталей (небольшим постоянным усилием, не превышающим предел текучести материала).

Диффузионную сварку производят в специальных сварочных установках (рис. 3.64). Свариваемые детали *б* с тщательно зачищенными и пригнанными поверхностями помещают в вакуумную камеру *1*, в которой создают вакуум  $133 \cdot (10^{-3} \dots 10^{-5})$  Па, для защиты от интенсивного окисления и азотирования в процессе разогрева и сварки. Источником нагрева свариваемых деталей может служить вольфрамовый или молибденовый нагреватель, электронный луч или индуктор ТВЧ *5*.

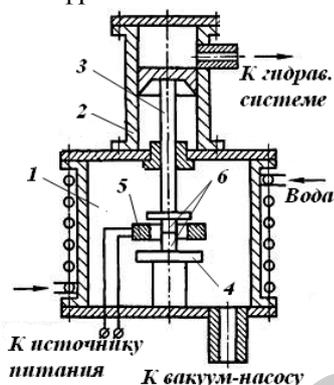


Рис. 3.64. Принципиальная схема установки для диффузионной сварки в вакууме: *1* — вакуумная камера; *2* — цилиндр гидропривода; *3* — поршень; *4* — стол для крепления деталей; *5* — индуктор; *6* — свариваемые детали

После того как достигнута требуемая температура ( $0,4 \dots 0,8 T_{пл}$ ) заготовок *б*, к ним прикладывают с помощью механического, пневматического или гидравлического устройства *2* небольшое постоянное сжимающее усилие ( $1 \dots 20$  МПа), повышающее пластичность и ускоряющее процесс диффузии, в течение  $5 \dots 20$  минут. После окончания сварки детали охлаждаются и их выгружают из камеры.

Приложение давления в процессе сварки обеспечивает, во-первых, разрушение в результате пластического течения поверхностных слоев металла и частичное удаление оксидных пленок и загрязнений, и, во-вторых,

сближение свариваемых поверхностей для обеспечения их физического контакта и эффективного межатомного взаимодействия. Следует отметить, что давление при диффузионной сварке не должно вызывать заметных пластических деформаций деталей. Максимальное усилие  $P$ , с которым можно сдавливать детали, ориентировочно определяют, зная площадь соприкосновения деталей  $F$  и среднее значение предела текучести  $\sigma_T$  при температуре сварки ( $P = \sigma_T F$ ).

Проведение процесса сварки при повышенной температуре обеспечивает, во-первых, повышение пластичности металла и, тем самым, снижение давления, необходимого для смятия микронеровностей и сближения свариваемых поверхностей, и, во-вторых, активацию поверхностей для протекания процессов диффузии и рекристаллизации. С повышением температуры сварки скорость диффузии атомов увеличивается и процессы очистки поверхности металлов от оксидов ускоряются. Однако металлы, склонные к увеличению зерна при нагреве, сваривают при более низких температурах. Кроме того, стремятся снизить температуру сварки тонких деталей (во избежание их деформаций). Сварка изделий из разнородных материалов производится при температуре, выбираемой в соответствии с температурой плавления наиболее легкоплавкого материала.

Время выдержки при заданных температуре и давлении в большинстве случаев должно быть минимальным. Для получения прочного соединения время сварки определяется установлением плотного контакта между соединяемыми поверхностями и минимальной диффузией атомов через поверхность соединения. Объясняется это тем, что диффузия может привести к образованию пустот в зоне соединения, а при сварке разнородных металлов и сплавов (в ряде случаев) — к образованию интерметаллических фаз.

Защитная среда, в которой происходит диффузионная сварка, в значительной мере влияет на качество сварного соединения, и из-за этого чаще всего осуществляется в вакууме, имеющем хорошие защитные свойства. В вакууме не только исключается взаимодействие с кислородом и азотом воздуха, но и удаляются оксидные пленки, присутствующие на свариваемых поверхностях. Следует отметить, что в качестве защитной среды используют также инертные (He, Ar) или восстановительные газы ( $H_2$ , CO).

*Преимуществами* диффузионной сварки являются следующие:

1) возможность сваривать детали из практически всех известных конструкционных материалов, в том числе разнородных и с сильно различающимися теплофизическими свойствами (алюминий со сталью и титаном, сталь с графитом, стекло с медью и т. д.);

2) высокое качество сварного соединения и сохранение им свойств, характерных для исходных материалов;

3) стабильность качества соединений, что обусловлено возможностью соблюдать основные параметры процесса (температуру, давление и время);

4) возможность образования соединений с минимальной (5...7 %) деформацией деталей, что позволяет изготавливать сложные высокоточные изделия с допусками, которые не превышают допуски на размеры при механической обработке;

5) расход энергии и мощность в 4...6 раз меньше, чем при контактной сварке, что обусловлено относительно низкой температурой и малым временем нагрева.

*Недостатками* диффузионной сварки являются следующие:

1) необходимость тщательной предварительной подготовки деталей к сварке (соблюдение параллельности стыкуемых поверхностей, обеспечение высокой чистоты их обработки);

2) сложность достижения полного физического контакта (при сварке деталей с большой площадью соприкосновения);

3) сложность контроля качества сварных соединений (например, образующиеся в результате случайных загрязнений поверхностей местные непровары (склейки) неразрушающими методами контроля не выявляются);

4) высокая стоимость используемого оборудования;

5) низкая производительность процесса из-за наличия некоторых операций (вакуумирование камеры, нагрев деталей, выдержка для протекания процесса диффузии).

Диффузионной сваркой соединяют детали различной формы. Они могут иметь компактные (рис. 3.65, *а*) или развитые (рис. 3.65, *б*) поверхности контактирования. Геометрические размеры свариваемых деталей находятся в пределах от нескольких микрометров (полупроводниковые приборы) до нескольких метров (слоистые конструкции).

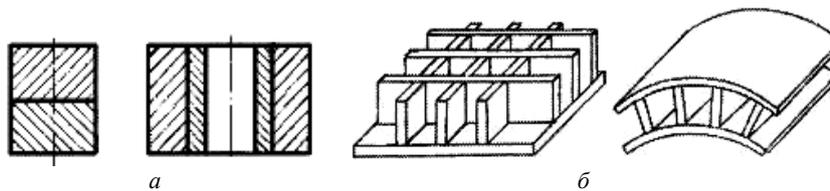


Рис. 3.65. Типы сварных конструкций, полученных диффузионной сваркой:  
*a* — с компактной поверхностью контактирования ; *б* — с развитой  
 поверхностью контактирования

Диффузионной сваркой можно соединять детали из однородных и разнородных сплавов, в том числе тугоплавких, которые невозможно получить другими способами (например, сваривают стальные детали с чугунами, алюминиевыми, вольфрамовыми, титановыми, молибденовыми; медные с алюминиевыми и титановыми; золотые с бронзовыми; платиновые с титановыми; серебряные со стальными; вольфрамовые с ниобиевыми; керамические с медными и титановыми; стеклянные с титановыми и т. д.

В настоящее время диффузионная сварка используется:

- в электротехнической и электронной промышленности (при изготовлении и сборке катодных ножек и других деталей, упругих элементов датчиков и узлов электронных приборов, магнитов, электромагнитных контакторов, масляных, вакуумных и автоматических выключателей, контактов, комплектных трансформаторных подстанций и шинпроводов);
- в инструментальной промышленности (при изготовлении высокостойких штампов и режущего инструмента);
- в химической и нефтяной промышленности (при изготовлении сложных и точных конструкций аппаратов, плакированных серебром, элементов скважинных насосов и пористых труб);
- в авиационной, судостроительной и космической промышленности (при изготовлении вольфрамовых сопел, многослойных панелей, лопаток турбин двигателей);
- в машиностроении (для изготовления клапанов, гильз цилиндров двигателей).

Некоторые примеры использования диффузионной сварки представлены на рисунке 3.66.

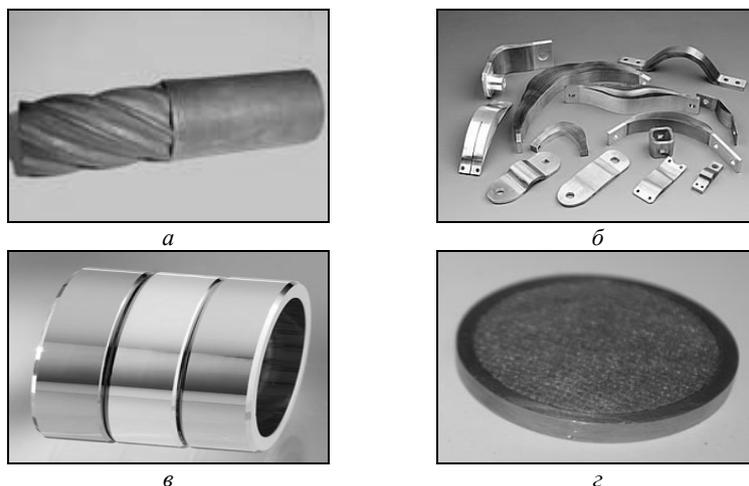


Рис. 3.66. Использование диффузионной сварки: *а* — концевой режущий инструмент (хвостовик — сталь 40Х; режущая часть — Р18); *б* — многослойные медные электроконтактные соединения; *в* — комбинация колец палладия, красного и желтого золота; *г* — фильтрующий элемент (соединение пористого диска с обечайкой)

**Сварка взрывом** — сварка давлением, при которой соединение осуществляется в результате соударения свариваемых частей, вызванного взрывом.

Сварку взрывом впервые наблюдал академик М. А. Лаврентьев в 1944 г. при испытаниях новой брони. Вместо монолитной плиты использовали два плотно прижатых друг к другу стальных листа. При осмотре мест прямого попадания в них снарядов был обнаружен неизвестный ранее эффект: листы сваривались между собой, образуя характерный волнообразный шов. Тогда это явление не вызвало особого интереса, поскольку ученых, прежде всего, интересовал практический результат (защита боевой техники). Сварку взрывом стали изучать в начале 60-х годов XX века в Институте гидродинамики Сибирского отделения Академии наук СССР, а затем в Институте электросварки им. Е. О. Патона (Киев). Параллельно с учеными из СССР сваркой взрывом начали заниматься ученые в США, а позже — в Швеции, ФРГ, Японии.

При сварке взрывом соединение образуется при соударении двух свариваемых деталей под действием ударной волны, в результате чего привариваемая (метаемая) деталь с большой скоростью

бросается к ударяемой детали. Скорость движения метаемой детали к моменту соударения достигает нескольких сотен метров в секунду, приближаясь к скорости артиллерийского снаряда. В зоне соударения в результате пластической деформации металл соединяемых деталей течет подобно жидкости и сливается в одно целое, образуя монолитное соединение.

Принципиальная схема сварки взрывом приведена на рисунке 3.67. Неподвижную пластину (основание) 4 и метаемую пластину 3 располагают под углом  $\alpha = 2...16^\circ$  на заданном расстоянии  $h = 2...3$  мм от вершины угла. На метаемую пластину укладывают заряд взрывчатого вещества 2, масса которого составляет 10...20 % от массы пластины. В вершине угла устанавливают детонатор 1. Сварка производится на опоре 5.

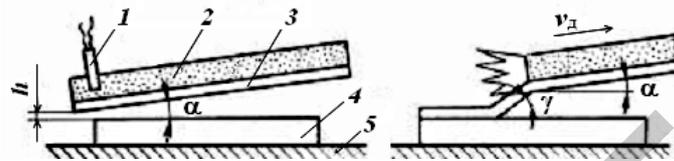


Рис. 3.67. Угловая схема сварки взрывом: а — до начала взрыва; б — на стадии взрыва

После инициирования взрыва детонация распространяется по заряду взрывчатого вещества со скоростью  $v_d = 2\ 000...4\ 500$  м/с и давлением 10...20 ГПа. Под действием высокого давления расширяющихся продуктов взрыва метаемая пластина приобретает скорость  $v_c = 200...700$  м/с, соударяется и приваривается с неподвижной пластиной под углом  $\gamma$ , который увеличивается с ростом отношения  $v_c/v_d$ . В месте соударения возникает эффект кумуляции (из зоны соударения с высокой скоростью выбрасывается кумулятивная струя, состоящая из металла соединяемых заготовок и воздуха). Эта струя обеспечивает очистку свариваемых поверхностей в момент, непосредственно предшествующий их соединению. Со свариваемых поверхностей при обычно применяемых режимах сварки удаляется слой металла суммарной толщиной 1...15 мкм.

Соударение метаемой пластины и основания сопровождается пластической деформацией, вызывающей местный нагрев поверхностных слоев металла. В результате деформации и нагрева образуется

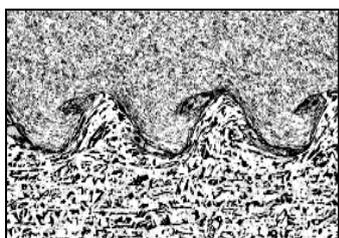


Рис. 3.68. Микроструктура зоны соединения при сварке взрывом

сварное соединение. Высокоскоростное соударение твердых тел при сварке взрывом сопровождается процессом волнообразования на поверхности контакта, поэтому граница между соединенными деталями на микрошлифах имеет вид волнистой линии (рис. 3.68).

В качестве взрывчатого вещества используют аммонал, тол, гексоген

и т. п. Толщина метаемой пластины может составлять от 0,05 мм до 30 мм, а толщина основания не ограничена.

Сварка взрывом применяется также для плакирования стержней и труб, внутренних поверхностей цилиндров и цилиндрических изделий.

Сварку взрывом осуществляют в специальных бронекерах и на открытом пространстве. Она не требует сложного оборудования и может быть автоматизирована. Сварка взрывом является промежуточной операцией при прокатке, волочении, экструзии слоистых материалов.

*Преимуществами* сварки взрывом являются следующие:

1) возможность получения соединений из разнородных металлов и сплавов с различными физико-механическими характеристиками (сталь с алюминием, сталь с медью, медь с алюминием). Эти соединения не свариваются другими способами из-за образования хрупких интерметаллических соединений, с прочностью, превышающей прочность свариваемых материалов;

2) возможность получения зоны сплошного соединения по поверхностям двух и более крупногабаритных заготовок площадью до десятков квадратных метров;

3) отсутствие специальной технологической оснастки и оборудования, что значительно удешевляет и упрощает технологию сварки.

*К недостаткам* сварки взрывом можно отнести следующие:

1) необходимость строгого соблюдения правил техники безопасности и хранения взрывчатых веществ;

2) возможность перегрева свариваемых заготовок, приводящего к интенсивной диффузии в зоне соединения. Это вызывает необходимость проводить сварку с использованием промежуточных про-

слоек из металлов, не образующих химических соединений со свариваемыми материалами (например, при сварке изделий из титана и стали используют в качестве промежуточного материала ниобий, ванадий или тантал).

Сваркой взрывом можно получать плоские многослойные (площадью до 50 м<sup>2</sup>) и цилиндрические изделия, в том числе длиномерные, с толщиной плакирующего слоя 0,05...30 мм (для листов) и 0,5...15 мм (для труб).

Методом сварки взрывом можно соединять разнородные металлы и сплавы (табл. 3.5), получая разнообразные биметаллические, многослойные и композиционные материалы с улучшенными прочностными, коррозионно-стойкими, жаропрочными и другими свойствами.

Таблица 3.5

Свариваемость изделий из различных металлов и сплавов сваркой взрывом

Металл, сплав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1. Углеродистая сталь	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
2. Легированная сталь		+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+
3. Нержавеющая сталь			+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-
4. Алюминий				+	+	+	+	+	+	+	-	-	+
5. Медные сплавы					+	+	+	+	+	+	-	-	-
6. Никелевые сплавы						+	+	+	-	-	+	+	+
7. Титан							+	+	+	+	-	-	+
8. Тантал								+	+	-	+	-	-
9. Ниобий									+	-	-	+	-
10. Серебро										+	-	-	-
11. Золото											+	-	-
12. Платина												+	-
13. Магний													+

Примечание: + — сварка возможна; — — сварка невозможна.

Сварка взрывом применяется:

- в тяжелом машиностроении (изготовление лопастей рабочих колес гидротурбин, гидроаккумуляторов и корпусов атомных реакторов, тяжело нагруженных подшипников скольжения и др.);
- в судостроительной промышленности (изготовление деталей корпусов облегченных судов, судовых турбин и др.);

- в электротехнической промышленности (изготовление электроконтактов, проводов высоковольтных линий электропередач, специальных устройств преобразования электромагнитной энергии и др.);
- в нефтяной промышленности (изготовление композиционных материалов для производства цистерн для хранения и перевозки нефти и нефтепродуктов, теплообменных аппаратов, реакторов и др.);
- в химическом машиностроении (изготовление композиционных материалов со специальными свойствами плакирующего слоя для производства корпусов и деталей машин, автоклавов, цистерн, аппаратов обезжиривания, электролизеров и др.);
- в металлургической промышленности (изготовление крупнобаритных водоохлаждаемых биметаллических токоподводов, тоководущей арматуры ванн электролиза алюминия, токоподводов при получении цинка и т. п.).

Некоторые примеры использования сварки взрывом представлены на рисунке 3.69.

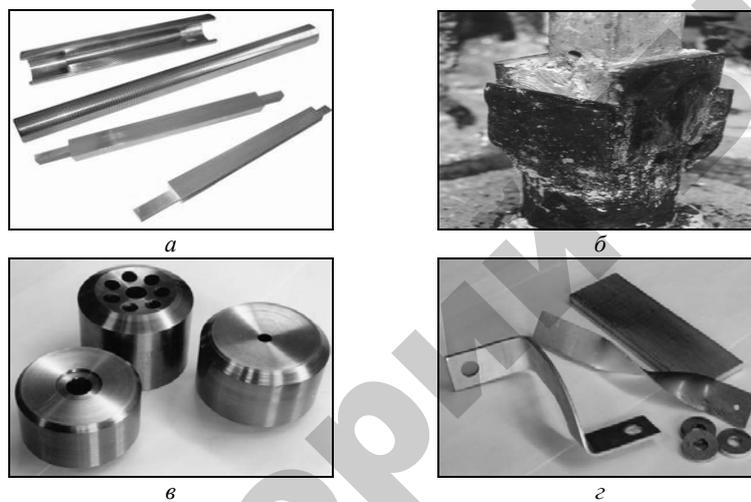


Рис. 3.69. Примеры использования сварки взрывом: *а* — многослойный биметаллический материал (до 200 слоев «медь – сталь»), предназначенный для изготовления специальных устройств преобразования электромагнитной энергии; *б* — электрод электролизера алюминия с переходниками («алюминий – сталь»); *в* — детали узла распределения аксиально-плунжерных насосов («сталь – бронза»); *г* — биметаллические контактные переходники («алюминий – медь»)

**Магнитно-импульсная сварка** — сварка давлением, при которой соединение осуществляется в результате соударения свариваемых частей, вызванного воздействием импульсного магнитного поля.

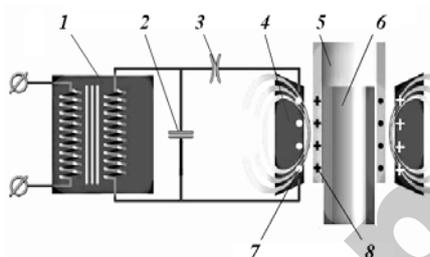
В 1927 г. академиком П. Л. Капицей была предсказана возможность использования силовых импульсных магнитных полей в технологических операциях по обработке металлов. Как технологическое направление магнитно-импульсная обработка начала реализовываться в конце 1950-х гг. и нашла применение в самолето- и ракетостроении (а впоследствии — в автомобильной промышленности).

Процесс магнитно-импульсной сварки был разработан в конце 1960-х гг. советскими учеными в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова (г. Москва) для герметизации топливных элементов ядерных реакторов.

Магнитно-импульсная сварка металлов основывается на использовании электромеханической силы, возникающей при взаимодействии мощного магнитного поля индуктора с магнитным полем заготовки, вызванным индуцированными в ней вихревыми токами.

В установку для магнитно-импульсной сварки (рис. 3.70) входят зарядное устройство 1, состоящее из высоковольтного трансформатора и выпрямителя, батарея высоковольтных конденсаторов 2, разрядное устройство 3 и индуктор 4, внутри которого размещены свариваемые цилиндрические заготовки 5 и неподвижная 6 заготовки.

Процесс магнитно-импульсной сварки состоит из цикла зарядки и цикла разрядки.



При цикле зарядки электрический заряд, необходимый для создания требуемого импульса энергии, с помощью зарядного устройства 1 накапливается в батарее высоковольтных конденсаторов 2. Во втором цикле при включении разрядного устройства 3 накопленный электрический заряд в виде мощного импульса электрического тока проходит через обмотку индуктора 4, в которой

Рис. 3.70. Принципиальная схема магнитно-импульсной сварки: 1 — зарядное устройство; 2 — батарея высоковольтных конденсаторов; 3 — разрядное устройство; 4 — индуктор; 5 — подвижная заготовка; 6 — неподвижная заготовка; 7 — линии магнитного поля индуктора; 8 — линии магнитного поля, индуцируемые в подвижной заготовке

создается магнитное поле 7. Магнитное поле 7 генерирует вихревые токи в токопроводящем материале метаемой заготовки 5, которые приводят к возникновению второго магнитного поля 8. Два мощных магнитных поля отталкиваются друг от друга с усилием, пропорциональным квадрату значения разрядного тока. В результате метаема заготовка 5 с огромной скоростью перемещается от обмотки индуктора к неподвижной заготовке 6. При соударении в зоне контакта соединяемых заготовок возникают сжимающие напряжения, превышающие предел текучести свариваемого материала, в результате чего образуется сварное соединение.

При магнитно-импульсной сварке усилие на метаемую заготовку передается мгновенно (со скоростью распространения магнитного поля) и движение сообщается не отдельным участкам (как при сварке взрывом), а всей метаемой детали. Для обеспечения последовательного перемещения зоны контакта при сварке детали устанавливают свариваемыми поверхностями под углом одна к другой. Соединение, как и при сварке взрывом, образуется в результате косоугольного соударения свариваемых поверхностей. При этом создаются условия для очистки свариваемых поверхностей от оксидов и загрязнений кумулятивной струей и для интенсивной пластической деформации поверхностей металла с образованием между ними металлических связей.

Существуют три основные схемы магнитно-импульсной сварки:

- 1) обжатием трубчатых заготовок с применением индуктора, охватывающего заготовку;
- 2) раздачей трубчатых заготовок с применением индуктора, помещенного внутрь заготовки;
- 3) деформированием листовых заготовок плоским индуктором.

Действие импульсного магнитного поля на метаемый элемент зависит, главным образом, от длины и числа витков индуктора, напряжения разряда, емкости батареи конденсаторов, энергии разряда, индуктивности и активного сопротивления разрядного контура, площади внутренней поверхности индуктора в поперечном сечении.

*Преимуществами* магнитно-импульсной сварки являются следующие:

- 1) получение высококачественных сварных соединений (в том числе герметичных, вибро- и термостойких), прочность которых превышает прочность соединяемых деталей;

2) возможность сварки деталей из разнородных материалов (алюминий – медь, алюминий – коррозионно-стойкая сталь, цирконий – коррозионно-стойкая сталь и др.);

3) возможность применения сварки в условиях цеха, а также возможность точного регулирования и контроля процесса (в отличие от сварки взрывом);

4) отсутствие необходимости применения механизмов сжатия (в отличие от других видов сварки давлением) из-за создания деформирующего усилия в самом металле;

5) технологическая гибкость процесса (одним и тем же индуктором можно сваривать детали различных конфигураций, управляя и меняя величину электромагнитного импульса);

6) культура производства и простота обслуживания оборудования (магнитно-импульсные установки работают бесшумно, экологически чисто, инструмент и узлы установок не нуждаются в смазке, отсутствует агрессивная среда, управление и контроль за работой производятся одним работником);

7) простота автоматизации и механизации процесса, что позволяет обеспечить его высокую производительность и соответствующие технико-экономические показатели.

К *недостаткам* магнитно-импульсной сварки относятся следующие:

1) ограниченность получения различных типов и размеров сварных соединений, что обусловлено прочностью и долговечностью индуктора;

2) возможность сварки деталей только из электропроводных материалов, поскольку магнитное поле индуктора интенсивно влияет на заготовку лишь тогда, когда за время разряда не успевает проникнуть через стенку заготовки;

3) необходимость предварительного нагрева менее пластичного материала при сварке деталей из разнородных материалов.

Магнитно-импульсной сваркой можно получать соединения трубчатых деталей между собой и с другими деталями, а также плоских деталей по наружному и внутреннему контуру. Диапазон толщины метаемых деталей составляет 0,5...2,5 мм.

Магнитно-импульсным способом можно сваривать детали практически из любых материалов в однородном и разнородном сочетаниях (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Металл, сплав	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Алюминий	+	+	+	+	+	+	+	+
2. Медь		+	+	+	+	+	+	+
3. Нержавеющая сталь			+	+	-	+	-	-
4. Никель				+	-	+	-	-
5. Магний					+	-	-	-
6. Титан						+	-	-
7. Цирконий							+	-
8. Молибден								+

*Примечание:* + — сварка возможна; - — сварка невозможна.

Магнитно-импульсная сварка применяется в машиностроении (авиационное и ракетно-космическое производство, автомобилестроение), в электротехнике и приборостроении, а также при научных исследованиях в области импульсных технологий.

Некоторые примеры использования магнитно-импульсной сварки представлены на рисунке 3.71.

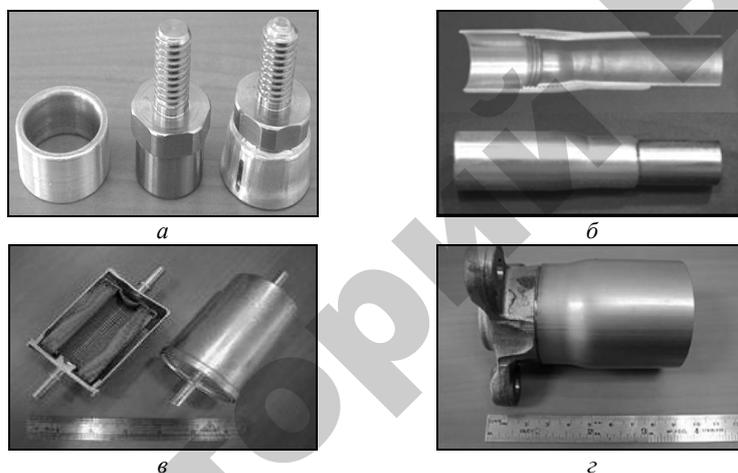


Рис. 3.71. Использование магнитно-импульсной сварки: а — сварка алюминиевого кольца и болта; б — сварка алюминиевой и медной труб; в — корпус топливного автомобильного фильтра; г — сварка стальной трубы с кованным стальным фланцем (карданный вал)

**Печная сварка** — сварка давлением, при которой нагрев свариваемых деталей производится в печах или горнах.

Печная сварка — древнейший вид сварки давлением. На протяжении почти трех тысячелетий человечество использовало железо, не умея его расплавлять. В этой связи к железу нельзя было применять давно известную литейную сварку и, как следствие, была изобретена печная (горновая) сварка, т. е. способ, предназначенный для железа. Развитию печной сварки чрезвычайно способствовал способ производства железа, просуществовавший на протяжении тысячелетий до второй половины XIX столетия.

Для нагрева свариваемых деталей при печной сварке используют различные источники тепла (твердое, жидкое или газообразное топливо). Для очистки поверхностей свариваемых деталей от оксидов используют флюсы, образующие с оксидами металлов легкоплавкие соединения. В качестве флюсов при печной сварке используются бура  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , борная кислота  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , поваренная соль  $\text{NaCl}$ , кварцевый песок, бой оконного стекла, а также их смеси.

После нагрева и офлюсования зону соединения свариваемых деталей подвергают пластическому деформированию. Деформирование вызывает течение металла вдоль поверхностей соединения, способствует выдавливанию из зоны соединения легкоплавких составляющих, образовавшихся при взаимодействии флюсов с оксидами свариваемого металла, и приводит к перемешиванию, взаимной диффузии и образованию межатомных связей между соединяемыми частями. Величина прикладываемого усилия при пластической деформации зависит от свойств металла свариваемого изделия и температуры нагрева. Чем выше нагрев, тем меньшее затрачиваемое усилие.

Пластическая деформация свариваемых заготовок при печной сварке может осуществляться ковкой (ручной или машинной), прокаткой или волочением. В соответствии с этим различают кузнечную сварку, сварку прокаткой и сварку волочением.

*Кузнечная сварка* — печная сварка, при которой пластическая деформация осуществляется ударами молота или нажатием пресса. Этот вид сварки является наиболее древним и постепенно вытесняется современными, более производительными видами сварки. Кузнечная сварка применяется при производстве различного со-

ставного инструмента (топоры, ломы, кирки и т. д.) из инструментальной низко- и среднеуглеродистой стали.

*Сварка прокаткой* — печная сварка, при которой пластическое деформирование материала осуществляется в зазоре между двумя вращающимися валками. Процесс может осуществляться на воздухе или в защитной атмосфере (вакуум, инертный газ). Сварка прокаткой применяется для получения биметаллов как из разнородных металлов (сталь и медь, сталь и латунь, медь и алюминий, алюминий и титан, алюминий, сталь и алюминий), так и из металлов, близких по химическому составу, но отличающихся по свойствам. Этот процесс применяется для производства листов, полос, лент, фасонных профилей, прутков, проволоки.

*Сварка волочением* — печная сварка, при которой пластическая деформация осуществляется путем протягивания свариваемых заготовок через постепенно сужающееся отверстие в специальном инструменте (волоке или фильере). При сварке волочением металлические полосы нагревают в печах, а затем нагретая полоса со свертышем на конце протягивается через волоку со скоростью несколько десятков метров в минуту. При этом происходит свертывание полосы в трубу и заварка продольного шва. Этот метод сварки используется при производстве сварных газовых труб, преимущественно небольших (не более 100 мм) диаметров. Производство таких труб является массовым. Их используют при монтаже газовых, водопроводных и других сетей.

*Преимуществами* печной сварки являются следующие:

- 1) относительная простота процесса;
- 2) отсутствие расхода дефицитных материалов.

*К недостаткам* печной сварки можно отнести:

- 1) низкая производительность процесса (медленный нагрев металла);
- 2) недостаточная прочность получаемого сварного соединения (менее 80 % от прочности свариваемых заготовок);
- 3) возможность значительного роста зерна, перегрева и пережога металла.

Эти недостатки печной сварки объясняют ее постепенное вытеснение современными методами сварки, в которых нагрев осуществляется газовым пламенем (газопрессовая сварка), токами высокой частоты (высокочастотная сварка) и др.

**Газопрессовая сварка** — сварка давлением, при которой для нагрева используется тепло пламени смеси горючего газа и кислорода, сжигаемой с помощью горелки.

При газопрессовой сварке (рис. 3.72) место соединения нагревают многопламенными сварочными горелками с большим количеством (до ста и более) огней, равномерно распределенных по нагреваемой поверхности. Нагрев обычно осуществляется ацетиленокислородным пламенем. За короткий промежуток времени (1...2 мин) нагреваемый участок доводится до пластического состояния или частично оплавляется. После нагрева осуществляется пластическая деформация зоны соединения, обеспечивающая образование сварного шва. Для пластической деформации при газопрессовой сварке могут использоваться молоты, прессы, прокатные валки или сварочные ролики.

Газопрессовую сварку применяют при сварке стальных стержней, полос (в том числе рессорных), рельсов (в том числе железнодорожных), трубопроводов и т. п.

Газопрессовая сварка обеспечивает высокое качество соединения, но из-за низкой производительности и относительно высокой стоимости находит ограниченное применение.

**Высокочастотная сварка** — сварка давлением, при которой нагрев осуществляется токами высокой частоты (ТВЧ).

Токи высокой частоты нашли промышленное применение в 1930-40-х гг., в основном, в области электротермии.

Работы по сварке металлов ТВЧ были начаты в 1944 г. в лаборатории профессора В. П. Вологодина применительно к сварке труб. К 1965 г. практически все трубопрокатные станы для производства сварных стальных труб малого и среднего диаметров были оборудованы устройствами для высокочастотной сварки.

Использование токов высокой частоты (ТВЧ) для сварки основано на проявлении поверхностного эффекта и эффекта близости.

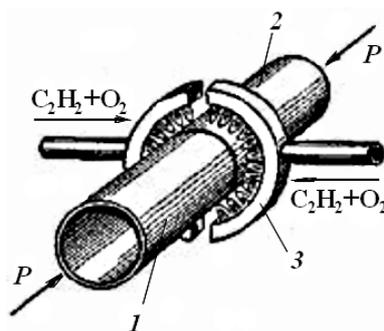


Рис. 3.72. Схема газопрессовой сварки труб: 1, 2 — свариваемые детали; 3 — кольцевая горелка

Проявление *поверхностного эффекта* заключается в том, что плотность переменного тока, протекающего по металлическому проводнику, распределена по его сечению неравномерно. Она максимальна на поверхности проводника и уменьшается по мере удаления от нее в глубь. Толщину этого поверхностного слоя называют глубиной проникновения тока. Чем выше частота тока, тем меньше глубина проникновения. Поэтому ток высокой частоты, проходя по проводнику, нагревает только его поверхностный слой. Чем больше частота тока, тем эффективнее поверхностный нагрев.

*Эффект близости* заключается в том, что токи высокой частоты, протекающие в двух параллельных проводниках и имеющие противоположные фазы, стремятся пройти по путям, находящимся в максимальной близости один от другого. Это явление позволяет управлять распределением тока высокой частоты по поверхности металла и локализовать нагрев в строго ограниченной зоне. Чем меньше расстояние между осями проводников и чем больше радиус сечения проводника, тем сильнее проявляется эффект близости.

Нагрев свариваемых изделий в результате поверхностного эффекта и эффекта близости реализуется за счет двух различных методов подвода тока (индукционного и контактного). В соответствии с этим высокочастотную сварку подразделяют на высокочастотную индукционную сварку и высокочастотную контактную сварку.

При **высокочастотной индукционной сварке** (рис. 3.73, *а*), основанной на поверхностном эффекте, свариваемое изделие *1* нагревают вихревыми токами, наводимыми магнитным полем, создаваемым близко расположенным к свариваемому изделию индуктором *2*, подключенным к генератору ТВЧ. Проходя по заготовкам, ток в месте их соприкосновения нагревает кромки, которые свариваются в результате их сближения под действием прижимных роликов *4*. Для повышения эффективности нагрева внутрь кольцевого индуктора (в трубную заготовку) вводится ферромагнитная масса (ферритовый магнитный сердечник *3*). В зависимости от используемых типов генераторов ТВЧ частота тока составляет 2,4...8,5 кГц.

При **высокочастотной контактной сварке** (рис. 3.73, *б*), основанной на эффекте близости, нагрев деталей *1* осуществляется токами высокой частоты, непосредственно протекаемыми в свариваемых деталях. В этом случае подвод тока к свариваемым деталям осуществляется с помощью электродов (скользящих контактов *5*),

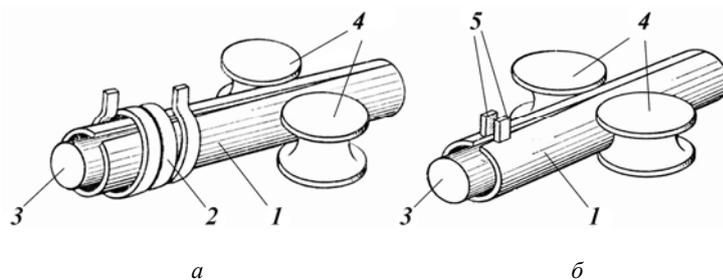


Рис. 3.73. Схемы высокочастотной сварки труб: *а* — индукционной; *б* — контактной; 1 — труба; 2 — индуктор; 3 — сердечник; 4 — обжимные ролики; 5 — скользящие контакты

непосредственно подсоединенных к источнику ТВЧ. Частота тока генераторов ТВЧ составляет 70...450 кГц.

*Преимуществами* высокочастотной индукционной сварки являются следующие:

- 1) производительность процесса (скорость сварки при индукционном нагреве достигает 50 м/с (при контактном — 25 м/с));
- 2) продолжительный срок службы индуктора (в отличие скользящих контактов, имеющих низкую износостойкость);
- 3) отсутствие на свариваемых деталях под индуктором рисок, царапин и т. п.;
- 4) экономичность установки (из-за отсутствия необходимости замены быстроизнашивающихся контактов).

*Преимуществами* высокочастотной контактной сварки являются следующие:

- 1) высокое качество сварного соединения (из-за небольшой зоны термического влияния вследствие малой глубины проникновения тока, приводящей к разогреву и расплавлению только поверхностных слоев свариваемых изделий);
- 2) уменьшение расхода электроэнергии, приходящейся на единицу готовой продукции (из-за сконцентрированного выделения теплоты только в зоне сварки);
- 3) возможность удаления оксидов из стыка в виде грата в момент сдавливания кромок.

Высокочастотной сваркой можно сваривать изделия из низко- и высокоуглеродистых, а также легированных сталей, алюминия, меди, латуни, титана и циркония.

Промышленное применение высокочастотной сварки связано, главным образом, с производством труб для машиностроения, строительства, нефте- и газодобычи, где этот вид сварки во многих случаях заменяет контактную сварку и дуговую сварку (рис. 3.74).

Высокочастотной сваркой изготавливают трубы с прямым или спиральным швом диаметром от 10 до 1 200 мм с толщиной стенки от 0,8 до 8 мм и длиной до 12 м. Высокочастотная сварка также применяется для изготовления профильных труб квадратного сечения и биметаллических полос толщиной до 14 мм.

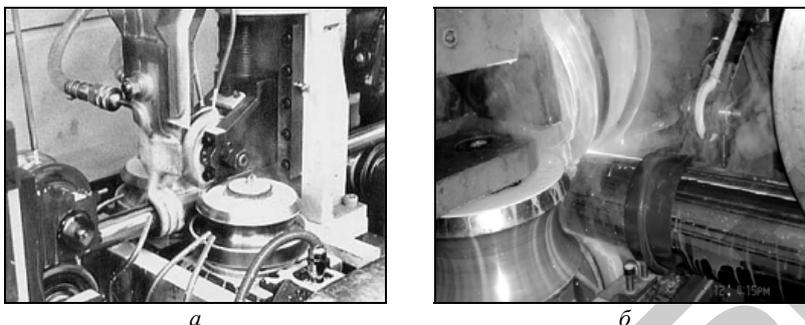


Рис. 3.74. Производство труб высокочастотной сваркой: *а* — индукционной; *б* — контактной

### 3.2. Термическая резка металлов

*Резка металлов* — отделение частей (заготовок) от полуфабрикатов из сортового, листового или литого металла. Различают механическую резку (ножницами, пилами, резцами), ударную (рубка) и термическую.

**Термической резкой** называют обработку металла — вырезку заготовок, строжку, создание отверстий — посредством нагрева. Паз, образующийся между частями металла в результате резки, называют резом. По форме и характеру реза резка может быть разделительной и поверхностной, по шероховатости поверхности реза — заготовительной и чистовой. Термическая резка отличается от других ее видов высокой производительностью при относительно малых затратах энергии и возможностью получения заготовок любого контура и большой толщины.

Различают три группы процессов термической резки: окислением, плавлением и плавлением – окислением.

При резке *окислением* металл в зоне резки нагревают до температуры его воспламенения в кислороде. Затем металл в этой зоне сжигают в струе кислорода, используя образующуюся теплоту для подогрева расположенных рядом с этой зоной участков металла. Продукты сгорания выдувают из реза струей кислорода и газов, образующихся при горении металла. К резке окислением относятся кислородная резка и кислородно-флюсовая.

При резке *плавлением* металл в месте резки нагревают мощным концентрированным источником тепла до температуры выше температуры плавления. При этом расплавленный металл удаляется из зоны реза под действием сил тяжести, электродинамических и других, либо выдувается специальной струей газа. К способам резки этой группы относятся дуговая резка, воздушно-дуговая, плазменная, лазерная и др.

Резка *плавлением – окислением* основана на процессах, характерных для двух предыдущих групп способов резки. К способам группы резки плавлением – окислением относятся кислородно-дуговая резка, кислородно-плазменная, кислородно-лазерная резка.

**Кислородная резка** — вид термической резки окислением, заключающийся в сжигании металла в струе кислорода и удалении этой струей образующихся оксидов.

Кислородная резка является самым распространенным способом термической резки черных металлов. Он основан на том, что температура воспламенения железа в кислороде ниже температуры его плавления. Это позволяет выжигать железо кислородом без его расплавления. Процесс кислородной резки осуществляют в следующей последовательности (рис. 3.75).

Для начала горения металл 3 подогревают в начальной точке реза ацетиленокислородным пламенем 2 до температуры его воспламенения

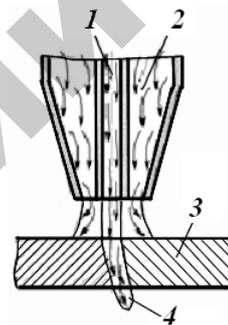
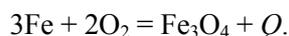


Рис. 3.75. Схема кислородной резки: 1 — струя режущего кислорода; 2 — смесь ацетилена и кислорода; 3 — основной металл; 4 — жидкий шлак

в кислороде (например, сталь — до 1 000...1 200 °С). Вместо ацетилена можно использовать более дешевые газы (природный газ или пропанобутановую смесь). Затем в зону реза направляют струю режущего кислорода  $I$ , и нагретый металл начинает гореть. В результате горения (окисления) железа образуется жидкий шлак  $4$ :



Жидкий шлак выдувается струей режущего кислорода из зоны реза. Горение металла сопровождается выделением теплоты, которая разогревает соседние с зоной реза участки до температуры их воспламенения в кислороде. Поэтому в дальнейшем процесс протекает без дополнительного подогрева, пока не будет разрезана вся заготовка. При этом перемещение струи кислорода осуществляется в соответствии с заданной формой реза.

Для обеспечения нормального процесса резки разрезаемый металл должен соответствовать следующим требованиям:

- 1) температура плавления металла должна быть выше температуры его горения в кислороде;
- 2) температура плавления оксидов металла должна быть ниже температуры его плавления;
- 3) количество теплоты, выделяющейся при сгорании металла в кислородной струе, должно быть достаточным для поддержания непрерывного процесса резки;
- 4) теплопроводность разрезаемого металла не должна быть слишком высокой (если теплота отводится слишком интенсивно, то процесс резки прерывается);
- 5) образующиеся оксиды должны быть достаточно жидкотекучими и легко выдвигаться струей режущего кислорода.

Этим условиям полностью удовлетворяют только низкоуглеродистые и низколегированные стали (легированные и высоколегированные стали, чугуны, медные и алюминиевые сплавы кислородной резкой не разделяются).

Резка может быть ручной и машинной. Для ручной резки применяют специальные резаки со сменными мундштуками. Ручная резка из-за неравномерности перемещения резака и вибрации режущей струи не обеспечивает высокого качества поверхности реза и требует последующей механической обработки.

Для получения реза высокого качества применяют машинную резку, которая обеспечивает равномерное перемещение резака по линии реза, строгую перпендикулярность режущей струи по отношению к разрезаемой поверхности и постоянное расстояние мундштука от поверхности металла. При машинной резке используют специальные автоматы и полуавтоматы с одним или несколькими резаками.

Кислородную резку используют для разделения металлов толщиной 5...300 мм. При резке металла толщиной более 300 мм применяют специальные резаки.

**Кислородно-флюсовая резка** — вид термической резки окислением, заключающийся в сжигании металла в струе кислорода с одновременной подачей порошкообразного флюса и удалении струей кислорода образующихся оксидов.

Кислородно-флюсовой резкой режут металлы и сплавы, неподдающиеся кислородной резке из-за образования тугоплавкого нежидкотекучего шлака, изолирующего поверхность металла от струи кислорода (например, высокохромистые и хромоникелевые стали, чугуны и медные сплавы). Дополнительная подача флюса в зону реза обеспечивает при окислении флюса образование шлака, который смешивается с тугоплавким шлаком и разжижает его. Кроме того, при сжигании флюса выделяется большое количество теплоты.

Основной составляющей большинства флюсов, применяемых при резке, является железный порошок. Так, хромистые стали режут с применением железного порошка без каких-либо добавок. При резке чугуна в состав флюса дополнительно вводят до 35 % феррофосфора, а при резке меди и ее сплавов (кроме 10...15 % феррофосфора) — до 20 % порошка алюминия.

Для кислородно-флюсовой резки применяют специальные установки, в комплект которых (кроме резаков особой конструкции) входит флюсопитатель, обеспечивающий подачу флюса в режущую струю кислорода.

Кислородно-флюсовую резку применяют для резки заготовок толщиной до 500 мм из высокохромистых и хромоникелевых сталей, серого чугуна (до 300 мм), меди (до 50 мм) и латуни (до 150 мм).

**Дуговая резка** — вид термической резки плавлением, заключающийся в том, что металл в месте реза проплавляют электриче-

ской дугой. Расплавленный металл стекает по стенкам образующегося углубления (реза) под действием силы тяжести и незначительного давления дуги. При резке электрической дугой можно использовать угольные или металлические электроды.

Резку угольным электродом ведут дугой прямой полярности при силе тока, равной 400...800 А, диаметре электрода — 10...20 мм. Этот метод применяют для резки заготовок из чугуна и цветных металлов, не подлежащих кислородной резке (например, при разделке крупногабаритного лома, разборке старых металлоконструкций, прожигании отверстий или выжигании заклепок). При этом качество резки и ее производительность низкие.

Использование металлического электрода обеспечивает более высокое качество резки. Она может быть выполнена на том же оборудовании и теми же электродами, которые используются при дуговой сварке. Резку металлическими электродами применяют при выполнении монтажно-сборочных или ремонтных работ.

**Воздушно-дуговая резка** — вид термической резки плавлением, заключающийся в том, что металл в месте реза проплавляют электрической дугой и выдувают струей сжатого воздуха. При этом способе используются неплавящиеся угольные или графитовые электроды, а расплавленный металл выдувается из полости реза потоком сжатого воздуха, подаваемого параллельно электроду.

Для воздушно-дуговой резки используют специальные воздушно-дуговые резаки, рассчитанные на силу тока до 1 000 А, и специальные угольные или графитовые электроды.

Этот способ позволяет резать заготовки из всех распространенных сплавов (кроме магниевых, поскольку в процессе резки они загораются).

Следует отметить, что основной областью применения воздушно-дуговой резки является поверхностная обработка металла (получение в нем различных углублений в виде отверстий и канавок, удаление дефектов с поверхности слитков и отливок и т. п.).

**Плазменная резка** — вид термической резки плавлением, заключающийся в интенсивном плавлении металла плазменной дугой или плазменной струей и выдувании расплава газовым потоком.

При резке *плазменной дугой* металл выплавляется из полости реза направленным потоком плазмы, создаваемым плазмотроном прямого действия.

При резке *плазменной струей* используют струю свободной газовой плазмы, создаваемой плазмотроном косвенного действия.

Плазменную резку целесообразно использовать для резки заготовок из всех металлов (особенно цветных).

Резку плазменной дугой применяют для разделения толстых листов из алюминия и его сплавов (до 80...120 мм), коррозионно-стойкой стали и медных сплавов. Для разделения заготовок из магниевых сплавов — это единственный способ термической резки. Толщина разрезаемой заготовки из металла при ручной резке составляет 80...100 мм, при автоматической — до 300 мм.

Плазменной струей режут тонкие стальные листы, заготовки из алюминиевых и медных сплавов, жаропрочных сплавов и т. д., а также неэлектропроводных материалов (например, керамики).

Основными *преимуществами* плазменной резки являются высокая производительность, чистота реза, снижение деформаций при резке заготовок малых толщин. Так, при резке стальных заготовок толщиной 6...20 мм скорость такой резки в 3...4 раза выше, чем при кислородной.

Основными *недостатками* плазменной резки являются следующие: сложность оборудования, сильный шум, повышенное содержание азота в кромке реза.

**Лазерная резка и электронно-лучевая резка** — виды термической резки плавлением, основанные на испарении металла под воздействием мощного концентрированного источника нагрева. Электронно-лучевая резка осуществляется в вакууме, лазерная — в обычной атмосфере. Резка этими методами отличается высокой чистотой и точностью реза, малой зоной термического влияния на кромках разрезаемого металла. Легкое и сравнительно простое управление лазерным излучением и электронным лучом позволяет осуществлять резку по сложному контуру плоских и объемных деталей с высокой степенью автоматизации процесса. Однако установки для электронно-лучевой резки и лазерной резки достаточно сложны и имеют повышенную стоимость.

Области применения основных способов резки металлов приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

## Области применения способов термической резки

Способ резки	Разрезаемый материал	Толщина материала, мм
Кислородная	Углеродистые и низколегированные стали	от 3 до 1 000
	Титан и его сплавы	от 3 до 100
Кислородно-флюсовая	Высоколегированные хромоникелевые и хромистые стали, чугун, медь, латунь, бронза	от 3 до 1 000
Воздушно-дуговая	Углеродистые и низколегированные стали	от 3 до 1 000
Плазменная	Конструкционные стали всех марок, алюминий, медь и сплавы на их основе, тугоплавкие металлы	от 3 до 100
Лазерная, электронно-лучевая	Конструкционные стали всех марок, алюминий, медь и сплавы на их основе, тугоплавкие металлы, титан	до 5

### 3.3. Пайка металлов

Использование пайки известно с древнейших времен. В гробнице вавилонской царицы (III тыс. лет до н. э.), в засыпанной пеплом Везувия Помпее (79 г. до н. э.), во время других раскопок в Египте, Риме и Греции — всюду археологи находили паяные металлические изделия. Припой древних римлян церарий и аргентарий по своему химическому составу близки к существующим в настоящее время ПОС-30 и ПОС-50.

В истории использования пайки можно выделить три периода, которые связаны с развитием источников нагрева и особенностями применяемой техники. Первый период начался в бронзовом веке, когда человечество начало изготавливать изделия из бронзы и источником нагрева служило твердое топливо. Второй период (конец XIX ст.) характеризуется началом применения для нагрева электрической энергии. Третий период начался в 1930–1940-х годах и связан с созданием техники из новых металлов и их сплавов — циркония, вольфрама, алюминиевых, титановых, высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов. Это привело во второй половине XX ст. к разработке принципиально новых способов пайки. В настоящее время технические возможности пайки значительно расширились. Во многих случаях пайка является единственно возможной технологией неразъемного соединения новых материалов.

**Пайка** — процесс получения неразъемного соединения металлов, находящихся в твердом состоянии, расплавленным припоем. Припой является материал с температурой плавления ниже температуры плавления паяемых материалов. При пайке (в отличие от сварки) плавится только присадочный сплав — припой, а между паяемым материалом и припоем протекает процесс взаимного растворения компонентов.

Требования, предъявляемые к паяному соединению и характеризующие условия его эксплуатации, определяются служебными свойствами изделия в целом: механическими свойствами, герметичностью, вакуум-плотностью, электросопротивлением, коррозионной стойкостью, стойкостью против термоударов, перегрузок и др.

В процессе пайки расплавленный припой вводится в зазор между нагретыми соединяемыми деталями. Припой смачивает поверхности деталей, растекается и заполняет зазор между ними. Взаимодействие припоя с материалом сопровождается растворением основного металла в жидком припое с образованием эвтектик и твердых растворов, взаимной диффузией компонентов припоя в сторону основного металла и компонентов основного металла в сторону припоя с последующей кристаллизацией жидкой прослойки.

Формирование прочного и надежного соединения зависит от химического состава взаимодействующих металлов, температуры и продолжительности пайки, определяющих физико-химические и диффузионные процессы, протекающие между припоем и основным металлом. Чем выше температура процесса и его длительность, тем больше степень взаимной диффузии между расплавленным припоем и основным металлом и тем выше механическая прочность соединяемых деталей. Кроме того, прочность пайки зависит от величины зазора между паяемыми деталями. Так, при малых зазорах улучшается затекание припоя под действием капиллярных сил, вследствие чего значение временного сопротивления паяного соединения больше значения временного сопротивления самого припоя.

Припой прочно соединяется с поверхностью изделия только тогда, когда хорошо смачивает ее. Для этого поверхность должна быть тщательно очищена от загрязнений. Кроме этого, для удале-

ния пленок оксидов с поверхностей паяемого материала и припоя и для предотвращения их образования при пайке используют паяльные флюсы. Флюсы, кроме того, способствуют лучшему затеканию припоя в зазор между соединяемыми деталями и растеканию по их поверхности. Некоторые припои, содержащие эффективные раскислители (бор, кремний, барий, щелочные металлы и др.) могут сами выполнять роль флюсов, переводя в шлак оксидные пленки.

Качество паяных соединений зависит от правильного выбора способа пайки, используемых основных и вспомогательных материалов, технологического процесса пайки.

**Способы пайки.** Современные способы пайки принято классифицировать по следующим признакам: механизмам удаления оксидной пленки с поверхности паяемого материала, видам процессов образования припоя в зазоре, условиям заполнения зазора припоем, температурным и временным режимами кристаллизации паяного шва, температуре пайки и используемым источникам нагрева, наличию или отсутствию давления на паяемые детали, одновременности и очередности выполнения паяных соединений (рис. 3.76).

По механизмам удаления оксидной пленки способы пайки делятся на флюсовые и бесфлюсовые.

Флюсовая пайка — пайка с применением флюса. При этом флюс может также участвовать в образовании самого припоя путем выделения компонентов, плавящихся при пайке.

Бесфлюсовая пайка — пайка без применения флюса, когда удаление оксидных пленок осуществляется в восстановительной или инертной газовой среде, вакууме, а также за счет применения ультразвука.

В первом случае удаление оксидов происходит при высоких температурах за счет их восстановления или самопроизвольного распада (диссоциации), а при ультразвуковой пайке их разрушение осуществляется за счет ультразвуковых колебаний, создаваемых в расплавленном припое, наносимом на соединяемый металл специальным паяльником.

По видам процессов образования припоя в зазоре способы пайки подразделяются на пайку готовым припоем, контактно-реактивную и реактивно-флюсовую.



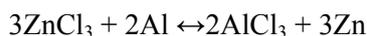
Рис. 3.76. Классификация способов пайки

Пайка готовым припоем — способ пайки, при котором используется заранее приготовленный припой. В качестве припоя может использоваться металлический (полностью расплавляемый) или композиционный припой. В композиционном припое помимо металлической основы содержится тугоплавкий наполнитель (порошки, волокна, сетки), который сам не плавится, а при плавлении металла припоя образует разветвленную сеть капилляров, удержи-

вающих под действием капиллярных сил его жидкую часть в зазоре между соединяемыми деталями.

Контактно-реактивная пайка — способ пайки, при котором жидкий припой образуется в результате межфазного взаимодействия и последующего контактного плавления соединяемых материалов или соединяемых материалов и прослойки промежуточного металла. К этому способу пайки относится сваркопайка. Сваркопайка — пайка разнородных материалов, при которой более легкоплавкий материал локально нагревается до температуры, превышающей температуру его плавления, и выполняет роль припоя.

Реактивно-флюсовая пайка — способ пайки, при котором припой образуется в результате химических реакций между основным металлом и флюсом. Например, при пайке алюминия с использованием флюса  $ZnCl_3$  в результате химической реакции восстановления



образуется цинк, который служит припоем.

По условиям *заполнения зазора припоем* пайку можно разделить на капиллярную (ширина зазора  $< 0,5$  мм) и некапиллярную (ширина зазора  $\geq 0,5$  мм).

При капиллярной пайке припой заполняет зазор между соединяемыми поверхностями и удерживается в нем за счет капиллярных сил. Соединение образуется в результате растворения металла основы в жидком припое и последующей кристаллизации раствора.

Некапиллярная пайка — способ пайки, при котором припой заполняет зазор под действием силы тяжести или прилагаемых извне сил (магнитных, электромагнитных и др.). К этому способу пайки относится пайкосварка. При пайкосварке форма кромок соединяемых заготовок подобна форме кромок при сварке плавлением. Соединение деталей осуществляется приемами, характерными для сварки, а в качестве присадочного металла используется припой, который под действием силы тяжести заполняет зазор.

Способы пайки *по температурным и временным режимам кристаллизации паяного шва* подразделяются на пайку с кристаллизацией при охлаждении и кристаллизацией при выдержке (диффузионная).

Температурный режим пайки с кристаллизацией при охлаждении состоит из нагрева припоя до температуры на  $50...100$  °C выше

температуры его плавления и последующего охлаждения соединения. Этот способ из-за относительно быстрого охлаждения характеризуется отсутствием диффузии в объеме взаимодействующих металлов.

Пайка с кристаллизацией при выдержке (диффузионная пайка) — способ пайки с изотермической выдержкой, при которой образование соединения сопровождается взаимной диффузией припоя и паяемого материала. Для диффузионной пайки характерна продолжительная выдержка при температуре образования паяного шва, а после завершения процесса — при температуре ниже солидуса припоя. В результате диффузии в шве образуются твердые растворы, что обеспечивает более однородный состав паяного шва и позволяет повысить его прочность и пластичность.

В зависимости от температуры пайки различают низко- и высокотемпературную пайку. При низкотемпературной пайке температура плавления припоя  $t_{пл} < 450$  °С, а при высокотемпературной —  $t_{пл} \geq 450$  °С. Целесообразность такого деления обусловлена тем, что используемые основные и вспомогательные материалы существенно отличаются по своим свойствам в зависимости от температуры процесса.

Способы пайки в зависимости от используемых источников нагрева разделяют на пайку в печах, индукционную, погружением, газопламенную, плазменную и паяльниками.

При пайке в печах соединяемые заготовки нагревают в специальных печах: электросопротивления, с индукционным нагревом, газопламенных и газовых. Припой заранее закладывают в шов собранного узла, на место пайки наносят флюс и затем изделие помещают в печь, где его нагревают до температуры пайки. Этот способ обеспечивает равномерный нагрев соединяемых деталей без заметной их деформации.

При индукционной пайке паяемый участок нагревают в индукторе токами высокой частоты. Для предохранения от окисления изделие нагревают в вакууме или в защитной среде с применением флюсов.

Пайку погружением выполняют в ваннах с расплавленными солями или припоями. Соляная смесь обычно состоит из 55 % KCl и 45 % HCl. Температура ванны — 700...800 °С. При пайке погружением в ванну с расплавленным припоем покрытые флюсом детали предварительно нагревают до температуры 550 °С. Пайку по-

гужением в расплавленный припой используют для соединения деталей из стальных, медных и алюминиевых сплавов.

При *газопламенной* пайке заготовки нагревают и припой расплавляют горелками для газовой сварки. В качестве горючих газов используют ацетилен, природные газы, водород, пары керосина и т. п.

При *плазменной пайке* плазмотроном, обеспечивающим более высокую температуру нагрева, паяют тугоплавкие металлы — вольфрам, тантал, молибден, ниобий и т. п.

При пайке *паяльниками* основной металл нагревают, а припой расплавляют за счет теплоты, аккумулированной в массе металла паяльника. Для низкотемпературной пайки применяют паяльники с периодическим и непрерывным нагревом и ультразвуковые. Паяльник с периодическим нагревом в процессе работы периодически подогревают посторонним источником теплоты. Для непрерывного нагрева используют электропаяльники. Паяльники с периодическим и непрерывным нагревом чаще используют для флюсовой пайки черных и цветных металлов легкоплавкими припоями с температурой плавления ниже 300...350 °С. Ультразвуковые паяльники применяют для бесфлюсовой пайки на воздухе и пайки алюминия. В этом случае оксидные пленки разрушаются за счет колебаний ультразвуковой частоты.

*По наличию или отсутствию давления на паяемые детали* способы пайки подразделяются на пайку без давления и пайку под давлением (прессовая пайка). Прессовая пайка используется в тех случаях, когда необходимо обеспечить четкую фиксацию взаимного положения деталей и требуемую величину зазора. Для сжатия деталей с требуемым усилием применяют специальные приспособления — механические зажимы. При высоких температурах этот способ нередко является единственно возможным.

*По одновременности выполнения паяных соединений* способы пайки делятся на одновременную пайку и ступенчатую. При одновременной пайке за один цикл нагрева в одном изделии (узле) выполняют несколько паяных соединений, а при ступенчатой — каждое последующее соединение выполняют после предыдущего.

**Материалы, применяемые при пайке.** Материалы, применяемые при пайке, делятся на основные и вспомогательные. К основным материалам относятся припои, а к вспомогательным — паяльные флюсы, восстановительные, инертные газовые среды и вакуум.

Классификация припоев осуществляется по многим признакам, основными из которых являются химический состав и температура плавления. Классификация по химическому составу осуществляется по основным химическим элементам, входящим в их состав (оловянно-свинцовые, оловянные, свинцовые, медно-цинковые, серебряные, медные, палладиевые и др.).

По температуре плавления все припои подразделяют на припои для низкотемпературной пайки ( $t_{пл} < 450$  °С): особо легкоплавкие ( $t_{пл} \leq 145$  °С) и легкоплавкие ( $145$  °С  $< t_{пл} < 450$  °С), и высокотемпературной пайки ( $t_{пл} \geq 450$  °С): среднеплавкие ( $450$  °С  $\leq t_{пл} \leq 1\ 100$  °С), высокоплавкие ( $1\ 100$  °С  $< t_{пл} \leq 1\ 850$  °С) и тугоплавкие ( $t_{пл} \geq 1\ 850$  °С). Припои для низкотемпературной пайки используют в промышленности и в быту для пайки изделий, которые не подвергаются воздействию высоких температур и значительных механических нагрузок. Припои для высокотемпературной пайки применяют тогда, когда требуется высокая прочность и (или) работоспособность при больших температурах.

**Припои для низкотемпературной пайки.** К особо легкоплавким припоям с температурой плавления 45...145 °С относятся сплавы эвтектического состава, содержащие висмут, свинец, олово, кадмий. К таким сплавам относятся, например, сплавы Гутри ( $t_{пл} = 45$  °С), Вуда ( $t_{пл} = 60,5$  °С), Липовица ( $t_{пл} = 70$  °С), Д'Арсенваля ( $t_{пл} = 79$  °С), Розе ( $t_{пл} = 93,7$  °С), Ньютона ( $t_{пл} = 96$  °С), ПОСВ 33 ( $t_{пл} = 130$  °С), ПОСК 50-18 ( $t_{пл} = 145$  °С).

Особолегкоплавкие припои находят применение, когда опасен перегрев не только паяемого материала, но и материала деталей изделия, не подвергаемых пайке. Такие припои широко применяются в электронике, электротехнике, в частности, при изготовлении приборов противопожарного назначения. Припой ПОСВ 33 применяется для пайки плавких сигнальных предохранителей, а ПОСК 50-18 — для деталей из меди и ее сплавов, не допускающих местного перегрева, в частности, полупроводниковых приборов.

Наиболее распространенными легкоплавкими припоями являются оловянно-свинцовые.

Маркировка оловянно-свинцовых припоев состоит из букв, обозначающих: П — припой, ОС — оловянно-свинцовый, Су — легированный сурьмой, и цифр, следующих после букв через дефис и обозначающих соответственно содержание олова и сурьмы. Буква М в марке припоя ПОС 61М обозначает легирующий элемент Си

(1,2...2 %). Содержание свинца в марке не указывается и определяется по разности. Например, ПОССу 10-2: П — припой, ОС — оловянно-свинцовый, 10 % Sn, 2 % Sb, остальное — Pb.

Оловянно-свинцовые припои (ПОС 90, ПОС 61, ПОС 40, ПОС 18, ПОС 10 и др.) обладают высокими технологическими свойствами и весьма пластичны. Пайку этими припоями проводят обычно при нагреве паяльником. Минимальную температуру плавления ( $t_{пл} = 190 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и лучшие технологические свойства имеет припой ПОС 61. Его состав близок к эвтектическому в системе «олово – свинец». Наиболее тугоплавким является припой ПОС 10 ( $t_{пл} = 299 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Такие оловянно-свинцовые припои применяются для пайки электро- и радиоаппаратуры (контактные поверхности электрических аппаратов, приборов, реле), точных приборов с высокогерметичными швами, где недопустим перегрев.

Для повышения прочности в оловянно-свинцовые припои вводят сурьму (ПОССу 61-0,5, ПОССу 25-0,5, ПОССу 9-2, ПОССу 10-2, ПОССу 4-4, ПОССу 4-6 и др.). Малосурьмянистые припои, содержащие 0,2...0,5 % Sb и обладающие повышенной пластичностью, обеспечивают получение герметичных швов и применяются для пайки оцинкованных и цинковых деталей. Такие припои применяются для пайки электроаппаратуры, обмоток электрических машин, оцинкованных радиодеталей при жестких требованиях к температуре, свинцовых кабельных оболочек электротехнических изделий неответственного назначения, радиаторов, теплообменников и др. Сурьмянистые припои, содержащие 2...6 % Sb, широко используются в различных отраслях техники, требующих повышенной прочности паяных соединений. Такие припои применяются для пайки холодильных устройств, деталей автомобилестроения, деталей с клепаными швами из латуни и меди и др.

Для уменьшения склонности меди к химической эрозии при пайке используют оловянно-свинцовый припой ПОС 61М, легированный медью в количестве (1,2...2 %), близком к его предельной растворимости при температуре пайки, но не ухудшающим технологических и специальных свойств припоя и паяных соединений. Припой ПОС 61М применяется для пайки тонких (толщиной менее 0,2 мм) медных проволок, фольги, проводников в кабельной, электро- и радиоэлектронной промышленности.

К легкоплавким припоям также относятся серебряные припои (ПСрО 10-90, ПСрОСу 8, ПСрМО 5, ПСрОС 3,5-95, ПСр 3, ПСр 3Кд, ПСр 2 и др.), содержащие серебро в незначительных количествах (1...10 %), а также олово, свинец или кадмий. В качестве легирующих элементов легкоплавких серебряных припоев выступают сурьма, медь или цинк. Максимальная температура плавления этих припоев составляет от 183 до 342 °С.

Легкоплавкие серебряные припои применяются для пайки меди, никеля и медных и медно-никелевых сплавов с посеребренной керамикой, проводов, работающих во всех климатических условиях без защиты соединений лакокрасочными покрытиями, стальных и серебряных изделий.

**Припои для высокотемпературной пайки.** Припои для высокотемпературной пайки обеспечивают более прочные соединения, чем припои для низкотемпературной, т. к. вследствие высокой температуры нагрева более интенсивно происходит взаимная диффузия элементов основного металла и припоя. Однако переходное электросопротивление таких припоев ниже, чем низкотемпературных.

К *среднеплавким припоям* с температурой до 1 100 °С относятся серебряные и медно-цинковые припои.

К *среднеплавким серебряным припоям* относятся припои, в состав которых помимо серебра (10...70 %) в значительных количествах входят медь (ПСр 72, ПСр 50 и др.) или медь и цинк (ПСр 70, ПСр 45 и др.). Широкое применение находит припой ПСр 72, имеющий эвтектический состав с очень хорошими технологическими свойствами. Припои ПСр 45, ПСр 50, ПСр 70, ПСр 72 отличаются высокой пластичностью и технологичны. Такие припои применяются для пайки меди, медных и медно-никелевых сплавов, никеля, кобальта, нейзильбера, латуни и бронзы, а также железоникелевых сплавов с посеребренными деталями из стали, титана и титановых сплавов с нержавеющей сталью и т. п.

Некоторые припои, помимо этих элементов, содержат кадмий (ПСрКдМ 50-34-16 и др.), олово (ПСр 62 и др.), марганец (ПСр 37,5), фосфор (ПСр 25Ф) и др. Припои с кадмием применяются для пайки цветных металлов и стали, с марганцем — меди и медных сплавов с жаропрочными сплавами и нержавеющей сталью, с фосфором (самофлюсующиеся припои) — меди с бронзой, меди с медью, бронзы с бронзой и т. п.

Медно-цинковые припои (ПМЦ 36, ПМЦ 48, ПМЦ 54) используются для пайки меди, медных сплавов и сталей. Маркировка медно-цинковых припоев состоит из букв: П — припой, МЦ — медно-цинковый, и цифр, показывающих процентное содержание меди, остальное — цинк.

К *высокоплавким припоям* с температурой плавления более 1 100 °С относятся припои на основе меди и палладия.

Чистая раскисленная медь М0, М1 весьма широко применяется для пайки углеродистых и легированных сталей, никеля и его сплавов. Она хорошо смачивает сталь и растекается по ней, имеет более высокую прочность, чем среднеплавкие припои, высокую пластичность и менее дефицитна, чем серебро. Температура пайки медью находится в интервале 1 100...1 200 °С.

Особенности взаимодействия меди с другими элементами позволяют создавать припои на ее основе с широким диапазоном температур пайки (700...1 200 °С). Например, легирование меди палладием и никелем вызывает непрерывное повышение температуры плавления медного припоя.

Для пайки деталей, работающих при высоких температурах, особенно подвергающихся трению (вентили и т. п.), используют медные припои, содержащие 2,5...10 % Fe, с температурой ликвидуса 1 180...1 230 °С или содержащие 20...30 % Fe, с температурой ликвидуса 1 200...1 230 °С. Припой, содержащий 75 % Cu и 25 % Ni ( $t_{пл} = 1 205$  °С), используется для пайки вольфрама и молибдена.

Припои с палладием, несмотря на их дороговизну и дефицитность, в последнее время находят широкое применение. Палладий, во-первых, менее дефицитен, чем другие металлы платиновой группы, во-вторых, образует непрерывный ряд твердых растворов со многими металлами (Ag, Cu, Au, Fe, Co, Ni и др.).

Использование палладия в качестве основы или в качестве легирующего элемента позволяет получать припои с температурой ликвидуса от 810 °С до температуры плавления палладия (1 552 °С).

Припои на основе палладия и никеля, легированные хромом, имеют высокую жаростойкость. Наименьшая температура ликвидуса таких сплавов 1 250 °С. Припой состава: 24 % Pd, 33 % Cr, 39 % Ni и 4 % Si используется для пайки жаропрочных сплавов.

Палладиевые припои применяют также для пайки керамики и графита со сталью и тугоплавкими металлами. Припой состава:

60 % Pd, 40 % Ni, легированный литием и бором, применяют для пайки графита с графитом или с тугоплавкими металлами — Mo, W или их сплавами. Паяные соединения, полученные с помощью таких припоев, работают в условиях нейтронного облучения в ядерных реакторах.

Припой на основе палладия и титана имеют температуру солидуса 1 440 °С, а соединения, паянные такими припоями, могут работать при температуре до 1 640 °С.

К *тугоплавким припоям* с температурой плавления более 1 850 °С относятся припои на основе тугоплавких металлов. Так, для диффузионной пайки сплава тантала с содержанием 1 % W в качестве припоя применяют чистый титан. Припой в виде фольги укладывается в места соединений, а пайку производят в вакуумной печи при температуре 1 900 °С и выдержкой 10 мин. Для капиллярной пайки применяют припой на основе Ta с 40 % Hf. Пайку выполняют при температуре 2 205 °С с выдержкой 1 мин. Также для пайки тантала применяется припой, содержащий 20 % Ta, 5 % Nb, 3 % W, остальное — Ti.

Для высокотемпературной пайки вольфрама используют припой с температурой плавления до 3 000 °С, в том числе чистые металлы (Ta, Nb, Ni, Cu) и сплавы (Ni–Ti, Ni–Cu, Mn–Ni–Co, Mo–W и др.).

**Флюсы.** Классификация флюсов осуществляется по нескольким признакам, основными из которых являются температура пайки и природа активатора.

В зависимости от температурного интервала активности паяльные флюсы подразделяются на флюсы для низкотемпературной (< 450 °С) и высокотемпературной (≥ 450 °С) пайки.

*Флюсы для низкотемпературной пайки* по природе активатора подразделяются на канифольные, галогенидные, гидразиновые, анилиновые и др.

В качестве флюса применяют чистую канифоль. В ее составе преобладают смоляные кислоты (80...95 %), имеющие общую формулу  $C_{19}H_{29}COOH$ . Канифоль удаляет оксиды таких металлов, как медь, серебро, олово, и широко используется для пайки соединений, в том случае когда промыть изделие после пайки нельзя (остатки канифоли не вызывают коррозии). Кроме того, в качестве флюса используют раствор канифоли в спирте, а также с добавками хлоридов ( $ZnCl_2$  и др.), анилина  $C_6H_5NH_2$  и органических веществ,

например, гидразина  $N_2H_4$ , глицерина  $HOCH_2-CHON-CH_2OH$  и др. С их помощью можно паять не только медные сплавы, но также стали, оцинкованное железо, никелированное железо, конструкционные и коррозионно-стойкие сплавы.

Галогенидные флюсы используют для низкотемпературной пайки почти всех черных и цветных металлов. Чаще всего применяют хлористый аммоний  $NH_4Cl$  и хлористый цинк  $ZnCl_2$ , а также смеси, содержащие эти и другие хлориды.

Широкое применение находят флюсы на основе солянокислого гидразина  $N_2H_4 \cdot 2HCl$  и анилина  $C_6H_5NH_2$ , а также других органических веществ. Соли гидразина при нагреве разлагаются с выделением водорода и хлористого водорода  $HCl$ , создающими защитную и восстановительную атмосферы. Анилин обладает высокой флюсующей активностью, причем образующийся после пайки остаток защищает шов от коррозии.

*Флюсы для высокотемпературной пайки* по природе активатора определяющего действия подразделяются на боридно-углекислые, галогенидные, фторборатные и др.

При пайке углеродистых сталей, чугуна и медных сплавов медно-цинковыми и серебряными припоями в качестве флюса используют борную кислоту  $H_3BO_3$  и буру  $Na_2B_4O_7$  в различных сочетаниях. При пайке легированных сталей и жаропрочных сплавов флюсующего действия буры и борной кислоты недостаточно, поэтому в состав флюса вводят галогениды. Чаще всего вводят фториды натрия  $NaF$ , калия  $KF$ , лития  $LiF$  и кальция  $CaF_2$ , а также фторбораты натрия  $NaBF_4$  и калия  $KBF_4$ .

Флюсы для высокотемпературной пайки алюминиевых, магниевых и титановых сплавов состоят из различных хлоридов ( $ZnCl_2$ ,  $NH_4Cl$  и др.) и фторидов ( $NaF$ ,  $KF$  и др.).

К вспомогательным материалам для пайки также относятся стоп-материалы, используемые при подготовке паяемой поверхности и наносимые на места, где нежелательно смачивание паяемого металла жидким припоем. Такие вещества подразделяют на стоп-пасты и покрытия, наносимые, например, гальваническим методом или распылением.

**Технологический процесс пайки.** Технологический процесс пайки изделия состоит из ряда операций и переходов, посредством которых он может быть осуществлен в определенном порядке. По-

мимо основной операции пайки он включает ряд подготовительных и финишных операций, обеспечивающих требуемые геометрические, механические и коррозионные характеристики паяных соединений и изделий.

К предварительным операциям пайки относится подготовка паяных поверхностей, включающая, во-первых, удаление жиров, масел, грязи, окалины и толстых неметаллических, в том числе оксидных пленок, образовавшихся в процессе химико-термической обработки, которые не могут быть удалены при пайке с помощью флюсов или газовых сред, во-вторых, обеспечение требуемой степени шероховатости паемых участков и оптимального направления рисок, образующихся при этом, необходимых для лучшего растекания и затекания припоя в зазор, в-третьих, правильное закрепление припоя и соединяемых деталей, внесение флюса.

К финишным операциям относятся удаление остатков флюсов, зачистка соединения от наплывов припоя, обработка изделия резанием, термообработка и контроль качества паяных соединений.

**Паяное соединение и его типы.** *Паяное соединение* — элемент паяной конструкции, полученной пайкой. Паяное соединение состоит из паяного шва 1 и диффузионных зон 2 (рис. 3.77). *Паяный шов* — часть паяного соединения, закристаллизовавшаяся при пайке. *Диффузионная зона* — часть паяного соединения с измененным химическим составом паемого материала в результате взаимной диффузии компонентов припоя и паемого материала.

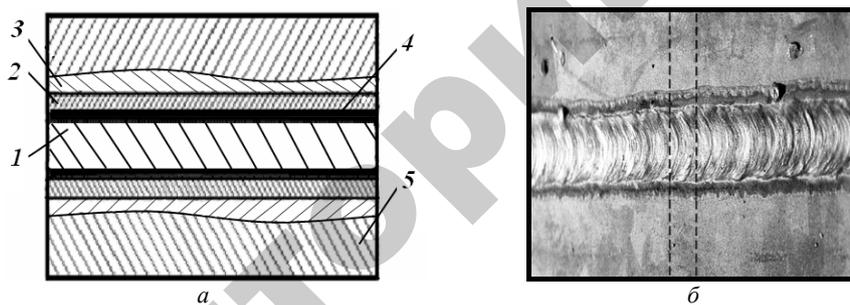


Рис. 3.77. Паяное соединение: а — схема; б — внешний вид; 1 — паяный шов; 2 — диффузионная зона; 3 — зона термического влияния; 4 — спай; 5 — паемый материал

К паяному соединению примыкает *зона термического влияния* 3 — часть паяемого материала 5 с измененными под влиянием нагрева при пайке структурой и свойствами. Пограничный слой между паяным материалом и швом в сечении паяного соединения называется *зоной сплавления (спаем)* 4.

Тип паяного соединения определяется взаимным расположением и формой паяемых элементов. Основными типами паяных соединений являются нахлесточное, стыковое, угловое, тавровое, соприкасающееся и комбинированное (рис. 3.78).

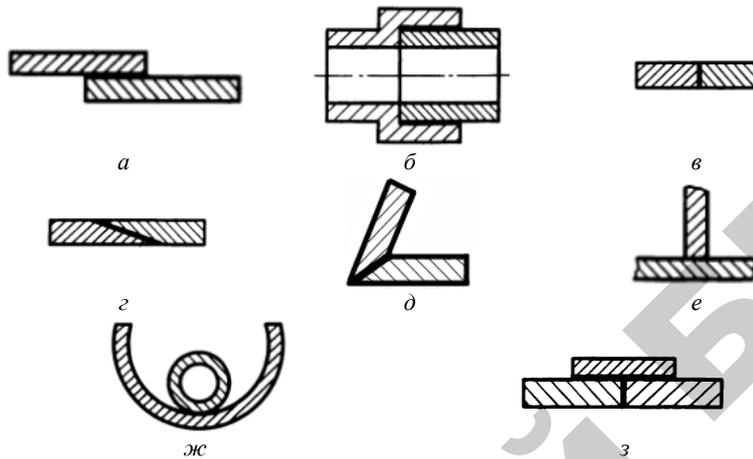


Рис. 3.77. Типы паяных соединений: а — нахлесточное; б — телескопическое; в — стыковое; г — косостыковое; д — угловое; е — тавровое; ж — соприкасающееся; з — комбинированное

Нахлесточное паяное соединение (рис. 3.78, а) является наиболее удобным для выполнения и обеспечивает наибольшую прочность. Увеличение длины нахлестки в сочетании с пластичными высокотемпературными припоями почти всегда позволяет достичь равнопрочности соединения с основным металлом. Разновидностью нахлесточного является телескопическое паяное соединение — соединение труб или трубы с прутком (рис. 3.78, б). В практике телескопические паяные соединения получили наиболее широкое применение для соединения фланцев или втулок с трубами, втулок со стержнем, труб с заглушками, компенсаторов и т. д.

Стыковые соединения (рис. 3.78, в) при пайке используют реже, т. к. они не обеспечивают равнопрочность всего соединения. Для повышения прочности стыкового соединения его выполняют косостыковым (рис. 3.78, з). При таком соединении прочность стыка повышается и нередко достигается равнопрочность с основным металлом.

Угловое и тавровое паяные соединения (рис. 3.78, д, е) применяются сравнительно редко, т. к. их прочность в значительной степени зависит от пластичности паяного шва, модуля упругости паяемого металла и формы поверхности шва.

Соприкасающееся паяное соединение — соединение, в котором паяемые элементы различной геометрической формы соединены по линии или в точках (рис. 3.78, ж). Такие соединения допустимы при конструировании изделий, швы которых работают на сжатие или при небольших нагрузках.

Комбинированное паяное соединение — соединение, представляющее собой различные комбинации паяных соединений: нахлесточного, стыкового, косостыкового, таврового, телескопического, соприкасающегося (рис. 3.78, з).

Пайка по сравнению со сваркой имеет следующие *преимущества*:

1) она позволяет соединять всевозможные сплавы, в том числе плохо сваривающиеся, однородные и разнородные, а также соединять металл со стеклом, керамикой, графитом, полупроводниками;

2) за один прием можно получить протяженное соединение или сварить узел из множества заготовок. Последнее важно при массовом производстве и, кроме того, позволяет изготавливать сложные по конструкции узлы, которые невозможно сделать другими способами;

3) кромки деталей не оплавляются, поэтому при пайке можно сохранить размеры и форму деталей и паяного узла в целом;

4) многие паяные соединения можно распаивать, что важно при монтаже и ремонте в приборостроении.

Процесс пайки дешев, легко поддается механизации и автоматизации, особенно при массовом производстве. Все это обеспечило широкое применение пайки для изготовления сложных, тяжело нагруженных деталей в разных областях машиностроения (при производстве радиаторов автомобилей и тракторов, камер сгорания жидкостных реактивных двигателей, лопаток турбин, топливных и масляных трубопроводов и др.). В ремонтном производстве пайку

используют для соединения или закрепления тонкостенных деталей и деталей из разнородных металлов, уплотнения резьбовых соединений, устранения пористости сварных швов чугуновых и бронзовых отливок, заделки свищей, трещин и т. д.

### 3.4. Наплавка и напыление металлов

**Наплавка** — нанесение посредством сварки плавлением слоя металла на поверхность изделия.

Появление технологии наплавки относится к 1896 г., когда Спенсер получил патент на изобретение. Однако промышленное применение началось несколько позже. В частности, в 1922 г. братья Студи впервые осуществили в США наплавку коронок нефтяного бура способом газовой сварки с использованием присадочного материала в виде стальной трубки, заполненной хромовым сплавом. Примерно в это же время была осуществлена наплавка клапанов двигателей внутреннего сгорания с помощью изобретенного Хейнзом кобальтохромовольфрамового сплава — стеллита. Первое время для наплавки использовали только газовую сварку, но по мере развития технологии стали использовать и другие способы.

Сущность процесса наплавки состоит в том, что на металлическую поверхность направляется мощный источник тепла и подается присадочный материал, который расплавляется совместно с материалом основы и образует жидкую ванну. При остывании в процессе кристаллизации формируется наплавленный слой, свойства которого определяются структурой и химическим составом наплавляемого материала и, как правило, отличаются от свойств и химического состава основного металла. Наплавка используется для нанесения на детали слоя металла, обладающего повышенной прочностью и твердостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью, кислотостойкостью и другими свойствами, что позволяет значительно увеличить срок службы деталей и намного сократить расход дефицитных материалов для их изготовления. Для сохранения неизменности состава, следовательно, и свойств наплавленного слоя процесс наплавки необходимо проводить таким образом, чтобы проплавление основного металла и его перемешивание с наплавляемым отсутствовало или было минимальным.

Наплавкой можно нарастить слой практически любой толщины (от долей миллиметра до нескольких сантиметров) различного химиче-

ского состава и физико-механических свойств на поверхности деталей простой и сложной формы. Помимо придания наплавляемым деталям новых свойств наплавка широко используется в ремонтном производстве для восстановления размеров изношенных деталей, устранения трещин и др. В этом случае химический состав наплавляемого слоя может соответствовать составу основного металла.

**Способы наплавки.** В зависимости от способа сварки, используемого при наплавке, наплавка подразделяется на электродуговую, электрошлаковую, газовую, плазменную и лазерную (рис. 3.79).

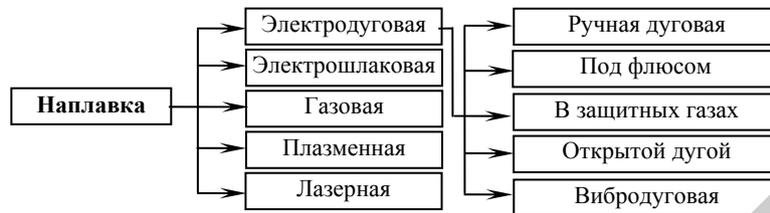


Рис. 3.79. Классификация способов наплавки

**Электродуговая наплавка** является наиболее широко распространенным способом наплавки. Она может быть ручной, автоматической или механизированной.

**Ручная дуговая наплавка** может осуществляться с помощью плавящегося и неплавящегося электродов.

*Ручная дуговая наплавка плавящимся электродом* является самым простым способом. При этом способе наплавки используется обычное сварочное оборудование и электроды с покрытиями, в состав которых помимо шлакообразующих и газообразующих компонентов могут входить и легирующие компоненты. Наплавку выполняют короткой дугой обратной полярности с использованием минимального тока. Для повышения производительности процесса применяют наплавку пучком электродов или трехфазной дугой.

Ручная дуговая наплавка плавящимся электродом позволяет наплавлять детали практически любой формы и в любом пространственном положении.

При *ручной дуговой наплавке неплавящимся (угольным) электродом* в качестве наплавочных материалов используют порошковые смеси, литые твердые сплавы, порошковую проволоку.

При наплавке порошковых смесей на очищенную поверхность насыпают тонкий (0,2...0,3 мм) слой флюса, затем слой порошка толщиной 3...5 мм и шириной до 20...60 мм, возбуждают дугу на основном металле, а затем переносят ее на слой порошка. Наплавку выполняют с использованием переменного или постоянного тока прямой полярности.

Область применения ручной дуговой наплавки — упрочнение рабочих органов сельскохозяйственных, строительных и дорожных машин, деталей горно-металлургического оборудования: бульдозерных и грейдерных отвалов, зубьев ковшей экскаваторов и др. при небольшой протяженности швов в различных пространственных положениях. Ручная дуговая наплавка широко применяется при наплавке штампов, режущего инструмента, рельсовых концов и крестовин, зубьев экскаваторов, бил размольных мельниц и т. п. Твердость наплавленных слоев при этом методе наплавки составляет 25...65 HRC.

Для повышения производительности процесса используют способы автоматической и механизированной дуговой наплавки. К ним относятся следующие виды: наплавка под флюсом, в среде защитных газов, открытой дугой и вибродуговая.

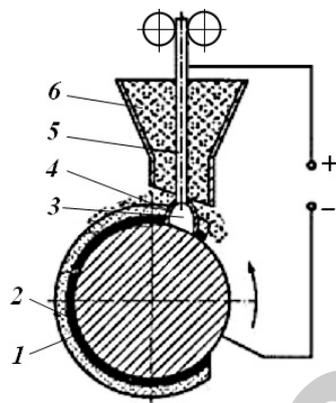


Рис. 3.80. Схема дуговой наплавки под слоем флюса:  
1 — шлаковая корка; 2 — наплавленный слой; 3 — газовый пузырь; 4 — оболочка расплавленного флюса; 5 — электрод; 6 — бункер с флюсом

Сущность процесса дуговой **наплавки под флюсом** заключается в применении в качестве электрода наплавочной проволоки сплошного сечения, электродной порошковой проволоки, порошковой или спеченной электродной ленты с использованием гранулированного флюса, насыпаемого впереди дуги слоем толщиной 50...60 мм (рис. 3.80).

При этом способе наплавки образование капель при плавлении электрода и их перенос в жидкую ванну происходят в газовом пузыре, заполненном парами металла и флюса, а взаимодействие с атмосферными газами практически исключается.

Наплавка под флюсом осуществляется в нижнем положении шва, чаще всего с использованием дуги обратной полярности. Для увеличения производительности применяется многоэлектродная наплавка или наплавка холоднокатаной лентой. Наплавочной холоднокатаной лентой можно наплавлять слой металла шириной до 100 мм.

**Наплавку в защитных газах** применяют в тех случаях, когда невозможна или затруднена наплавка под флюсом. Она может осуществляться плавящимся и неплавящимся электродами. Как и при сварке, наплавку неплавящимся электродом (вольфрамовым) осуществляют в среде аргона, а в качестве присадочного материала используют наплавочную проволоку сплошного сечения и литые прутки.

При наплавке в защитных газах плавящимся электродом, как и при наплавке под флюсом, используются наплавочная проволока сплошного сечения, электродная порошковая проволока, порошковая или спеченная электродная лента. Для защиты зоны горения дуги и жидкого металла используют углекислый газ, аргон или их смеси, иногда с добавлением кислорода.

При наплавке в защитных газах применяют два способа газовой защиты: струйную общую защиту и местную защиту в камерах (рис. 3.81).

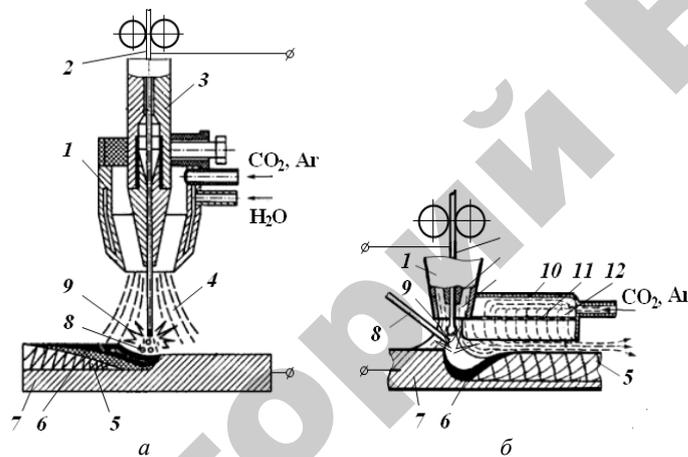


Рис. 3.81. Схема дуговой наплавки в защитных газах: а — со струйной общей защитой; б — с местной защитой в камере; 1 — сопло; 2 — электрод; 3 — мундштук; 4 — основной защитный газ; 5 — наплавленное покрытие; 6 — сварочная ванна; 7 — деталь; 8 — наплавляемый материал; 9 — электрическая дуга; 10 — корпус местной камеры; 11 — сетка; 12 — дополнительный защитный газ

При наплавке со струйной общей защитой обеспечивается защита только зоны расплавления (рис. 3.81, а). При этом возможно поступление воздуха на наплавляемый участок, поэтому для защиты жидкой ванны при нанесении покрытий из активных металлов применяют местные защитные камеры (рис. 3.81, б).

Наплавка в защитных газах позволяет наносить покрытия на детали сложной формы в различных пространственных положениях, осуществлять непосредственное наблюдение за процессом и проводить его корректировку во время наплавки.

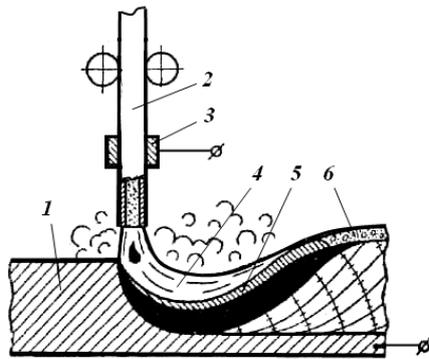


Рис. 3.82. Схема наплавки открытой дугой (порошковой проволокой):

- 1 — обрабатываемая поверхность;  
2 — порошковая проволока; 3 — токоподвод;  
4 — электрическая дуга; 5 — расплавленный шлак; 6 — шлаковая корка

**Наплавка открытой дугой (или порошковой проволокой)** в основном не отличается от наплавки в защитном газе плавящимся электродом (рис. 3.82). Порошковая проволока представляет собой стальную оболочку, заполненную шихтой, включающей порошки легирующих элементов, шлакообразующие и газообразующие компоненты, а также раскислители. В процессе горения дуги шлакообразующие и газообразующие компоненты проволоки выполняют защитную функцию.

Сущность процесса **вибродуговой наплавки** заключается в повторении циклов замыкания и размыкания электрода с поверхностью наплавляемой детали под действием вибрации. В качестве электрода используется наплавочная проволока сплошного сечения.

Процесс вибродуговой наплавки осуществляется следующим образом (рис. 3.83). Наплавочная проволока (электрод) 4, соединенная с вибрирующим элементом 5, подается на вращающуюся деталь 3. Вибрирующий элемент приводится в действие электромагнитным или механическим вибратором с частотой 50 Гц и амплитудой 1,5...2,5 мм. Каждый цикл вибрации электрода включает в себя четыре последовательные стадии (рис. 3.83): а — короткое замыкание (касание электрода наплавляемой поверхности детали);

*b* — отрыв электрода от детали (возникновение дуги); *в* — процесс наплавки сварочной дугой; *г* — гашение дуги (холостой ход).

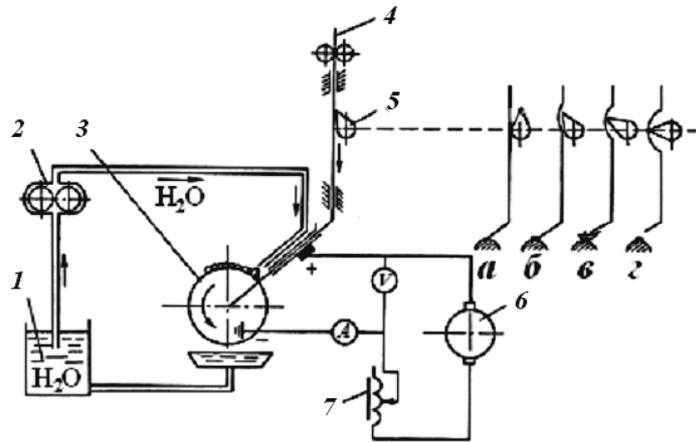


Рис. 3.83. Схема установки для вибродуговой наплавки деталей: 1 — емкость с охлаждающей жидкостью; 2 — водяной насос; 3 — деталь; 4 — наплавочная проволока; 5 — вибрирующий элемент; 6 — источник тока; 7 — регулятор режима наплавки металла

В процессе наплавки изделие вращается, а проволока, совершая возвратно-поступательное движение, перемещается по его образующей. Одновременно в зону наплавки подается охлаждающая жидкость, которая защищает наплавленный металл от воздействия воздуха и, охлаждая деталь, способствует уменьшению зоны термического влияния и снижает сварочные деформации. В качестве охлаждающей жидкости применяются водные растворы солей, содержащие ионизирующие вещества (например, кальцинированную соду), облегчающие периодическое возбуждение дуги после ее гашения. Вибродуговую наплавку можно осуществлять не только в среде охлаждающей жидкости, но и под флюсом, в защитных газах и т. д.

По сравнению с дуговой вибродуговая наплавка характеризуется меньшей величиной зоны термического влияния и позволяет наносить слои наплавленного металла толщиной 0,5...2,0 мм при восстановлении деталей из стали, серого и ковкого чугунов (шейки валов, шлицы, резьбовые поверхности и др.).

При **электрошлаковой наплавке** электродная проволока (или лента) непрерывно подается и расплавляется внутри слоя электропроводного жидкого шлака, разогреваемого проходящим через него электрическим током.

Электрошлаковая наплавка характеризуется высокой производительностью (до 200 кг/ч) и позволяет наплавлять слои заданного химического состава на плоских поверхностях (рис. 3.84, *а*) и на поверхностях вращения (рис. 3.84, *б*), обеспечивая за один проход получение наплавленного слоя требуемой толщины с минимальным (до 10 %) его перемешиванием с металлом основы.

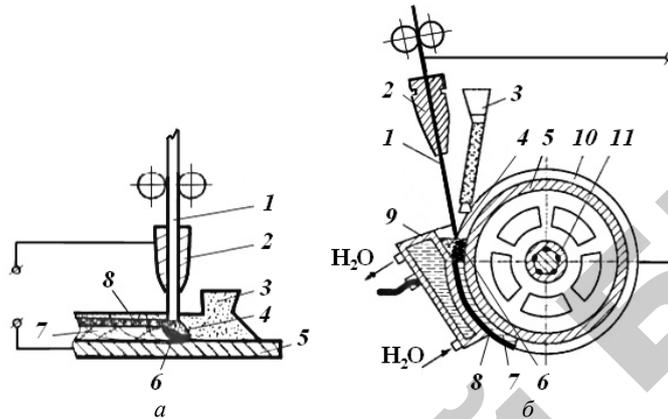


Рис. 3.84. Схема электрошлаковой наплавки: *а* — плоской поверхности; *б* — цилиндрической поверхности; 1 — наплавочный материал; 2 — токоподводящий мунштук; 3 — гранулированный шлак; 4 — шлаковая ванна; 5 — обрабатываемая поверхность; 6 — сварочная ванна; 7 — наплавленный металл; 8 — шлаковая корка; 9 — кристаллизатор; 10 — технологические пластины; 11 — оправка

Этот способ применяется для наплавки поверхностей прокатных валков, катков, гусениц тракторов, зубьев ковшей экскаваторов, крупномодульных зубьев шестерен и звездочек, в производстве заготовок для их последующей прокатки и получения биметаллических листов и др.

**Газовая наплавка** — распространенный способ наплавки, осуществляемый на стандартном оборудовании для газовой сварки. В качестве присадочного материала используются проволока сплошного сечения, порошковая проволока, литые прутки и по-

рошки из сплавов для наплавки. Присадочный металл в виде проволоки или прутков подается в сварочную ванну вручную или специальными механизмами. При наплавке порошковых материалов с помощью горелок специальной конструкции предварительно напыляют слой порошка на поверхность изделий, а затем оплавливают нанесенное покрытие. При наплавке небольших порций порошков процесс напыления осуществляют одновременно с оплавлением покрытия. Наплавка может проводиться во всех пространственных положениях и на деталях практически любой толщины и формы.

Производительность газовой наплавки составляет до 3 кг/ч, а толщина наплавленного слоя — 0,3...3 мм.

Газовая наплавка чаще всего применяется для устранения дефектов (трещины, раковины и т. д.) на корпусных деталях из бронзы, латуни и других цветных металлов (вкладыши, щеткодержатели электрических машин и др.).

**Плазменная наплавка** является наиболее прогрессивным способом нанесения износостойких покрытий на рабочую поверхность деталей при их изготовлении или восстановлении.

Плазменная наплавка выполняется с использованием порошковых материалов или проволоки из высоколегированных сталей, а в качестве плазмообразующего, защитного и транспортирующего газов обычно используется аргон. Расход газа и диапазон рабочих токов и напряжений при наплавке примерно тот же, что и при плазменной сварке.

Для плазменной наплавки порошковых материалов используются плазмотроны с дугой как прямого, так и косвенного действия. Однако в последнее время нашли широкое применение плазмотроны комбинированного действия. В таком плазмотроне (рис. 3.85) одновременно реализуется горение независимой дуги между вольфрамовым электродом и соплом и основной — между электродом и изделием. При горении независимой дуги происходит расплавление присадочного металлического порошка, а при горении основной — нагрев поверхности изделия и сплавление присадочного и основного металлов. Плазмотроны комбинированного действия обеспечивают минимальную глубину проплавления и минимальную долю основного металла в составе наплавленного, что является важнейшим технологическим *преимуществом* плазменной наплавки по сравнению с другими способами.

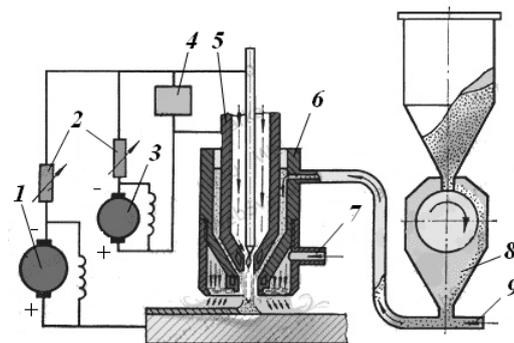


Рис. 3.85. Схема установки для плазменной наплавки металлическим порошком: 1 — источник питания дуги прямого действия; 2 — балластные сопротивления; 3 — источник питания дуги косвенного действия; 4 — осциллятор; 5 — сопло для плазмообразующего газа; 6 — корпус горелки; 7 — отверстие для ввода защитного газа; 8 — питатель для подачи порошка; 9 — трубка, по которой подается газ, несущий порошок

С помощью плазменной наплавки металлическим порошком можно получить жаростойкие и наиболее износостойкие покрытия из сплавов на основе никеля и кобальта. Этот способ позволяет получить тонкий равномерный слой покрытия с гладкой беспористой поверхностью, не требующей дополнительной механической обработки. Применение присадочного материала в виде порошка позволяет использовать для наплавки практически любые сплавы, что трудно осуществить при использовании присадочной проволоки.

При плазменной наплавке токоведущей присадочной проволокой дуга горит между вольфрамовым электродом (катодом плазмотрона) и проволокой (анодом), равномерно подаваемой в пространство между соплом и изделием. При таком способе обеспечивается более высокая производительность процесса наплавки при малой глубине проплавления основного металла, однако возможности получения тонкого и равномерного слоя ограничены.

Плазменная наплавка позволяет за один проход наносить слой толщиной от 0,25 до 9,5 мм и шириной от 1,2 до 45 мм.

Плазменная наплавка широко применяется для упрочнения поверхности и защиты от коррозии и износа деталей, работающих при высоких нагрузках и температурах. Этот способ наплавки можно выполнять на универсальных установках, позволяющих наплавлять

детали разной формы и размеров, или на специализированных установках, предназначенных для наплавки деталей одного типа.

Плазменную наплавку используют для упрочнения и восстановления клапанов двигателей внутреннего сгорания, дисков и седел арматуры, инструмента и др.

**Лазерная наплавка** — способ упрочнения при изготовлении и восстановлении деталей, при котором для нагрева используется энергия излучения лазера. Узкая фокусировка лазерного луча и высокая концентрация энергии в зоне его воздействия на материал исключает разогрев детали и искажение ее формы и позволяет осуществлять наплавку практически любых материалов. Быстрое охлаждение наплавленного металла (со скоростью до 2 000 °C/c) способствует получению высокотвердых структур как в поверхностном слое основного металла, так и в наплавленном.

Наиболее простой является наплавка порошковых материалов. Сущность этого процесса заключается в нанесении порошковой смеси на изношенную поверхность детали и в последующей ее обработке мощным излучением. Этот метод позволяет получать наплавленные поверхности толщиной до 0,1 мм. Производительность лазерной наплавки в условиях серийного производства может достигать до 1 кг/ч при доле основного металла в наплавленном 5...7 %.

Область применения лазерной наплавки — изготовление режущего инструмента, упрочнение рабочих поверхностей клапанов двигателей внутреннего сгорания, местное упрочнение рабочих поверхностей штампов и других тяжело нагруженных деталей в труднодоступных местах. Например, этот способ используют для наплавки лопастей турбин, распределительных валов и других деталей ответственного назначения.

**Материалы, применяемые для наплавочных работ. Электроды с покрытием.** Для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами используются металлические покрытые электроды (ГОСТ 10051-75 предусматривает 44 типа электродов). Обозначение типов электродов состоит из индекса Э и следующих за ним цифр и букв, маркировка которых аналогична маркировке сварочных электродов и определяет химический состав наплавленного материала. Так, для наплавки деталей, работающих в условиях интенсивных ударных нагрузок (осей, валов, автосцепок и др.), приме-

няются электроды типов Э-10Г2, Э-11Г3, Э-30Г2ХМ и др., для восстановления изношенных деталей из высокомарганцовистых сталей типов Г13 и Г13Л — Э-65Х11Н3, Э-65Х25Г13Н3, для металлорежущего инструмента — Э-80В18Х4Ф, Э-90В10Х5Ф2 и др., для деталей, работающих в условиях интенсивных ударных нагрузок с абразивным изнашиванием, — Э-95Х7Г5С, Э-30Х5В2Г2СМ.

**Наплавочная проволока сплошного сечения.** Для автоматической и механизированной дуговой наплавки применяется стальная наплавочная проволока сплошного сечения (ГОСТ 10543-98). Стандартом предусмотрен выпуск проволоки из углеродистых сталей 3-х марок, легированной стали 9-и марок и высоколегированной стали 9-и марок. Обозначение марки проволоки состоит из индекса Нп (наплавочная) и следующих за ним цифр и букв, показывающих содержание углерода и легирующих элементов. Углеродистые наплавочные проволоки (Нп-30, Нп-50, Нп-85) применяются, в основном, для восстановления размеров изношенных деталей (осей, валов, опорных роликов и др.). Легированные наплавочные проволоки (Нп-40Г, Нп-40Х2Г2М, Нп-50ХВА и др.) используются для восстановления деталей, испытывающих ударное и абразивное изнашивание (коленчатые валы двигателей внутреннего сгорания, шлицевые валы, оси, поворотные кулаки и др.). Высоколегированные наплавочные проволоки (Нп-20Х14, Нп-40Х13, Нп-30Х10Г10Т и др.) рекомендуются для наплавки деталей, работающих в условиях гидроабразивного изнашивания и высоких температур (лопасти гидротурбин, гребные валы морских судов, детали арматуры проходных печей и др.).

Для автоматической и механизированной наплавки также применяют стальную сварочную проволоку (ГОСТ 2246-70). Так, для антикоррозионной наплавки рекомендуются проволоки Св-08Х19Н10Г2Б, Св-04Х19Н11М3 и др.

Обычно для наплавки в защитных газах используют проволоку диаметром 1,6...2,2 мм, а для наплавки под флюсом — проволоку диаметром 3,0...5,0 мм и катанку диаметром 6,5 мм.

**Наплавочная порошковая проволока.** Порошковые проволоки являются в настоящее время преобладающим материалом для наплавки износостойких покрытий. Они изготавливаются методом волочения или прокатки в виде трубки, заполненной порошковой шихтой заданного химического состава, с краями, сформированными встык или внахлестку (рис. 3.86). Коэффициент заполнения (отно-

шение массы порошковой шихты к общей массе проволоки для наплавки в процентах) наплавочной порошковой проволоки не превышает 40...45 %. Чаще всего для наплавки под флюсом используются проволоки диаметром 3,6 мм и 1,8...3,2 мм — для механизированной и автоматической наплавки открытой дугой.

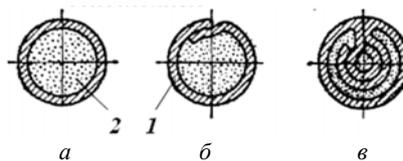


Рис. 3.86. Конструкции порошковой проволоки: *а* — трубчатая стыковая; *б* — трубчатая с нахлестом кромки; *в* — двухслойная; 1 — металлическая оболочка; 2 — порошковая шихта

Порошковые наплавочные проволоки производятся по ГОСТ 6101-84, который предусматривает 23 марки. Обозначение марки проволоки состоит из индексов ПП (порошковая проволока) и Нп (наплавочная) и следующих за ними цифр и букв, показывающих содержание углерода и легирующих элементов.

В зависимости от вида изнашивания для нанесения покрытий используются различные марки порошковых проволок. Так, при абразивном изнашивании с умеренными и значительными ударными нагрузками применяются порошковые проволоки марок ПП-Нп-200Х12М, ПП-Нп-200Х12ВФ, ПП-Нп-250Х10Б8С2Т, ПП-Нп-350Х10Б8Т2 и др.; при трении металла о металл при знакопеременных нагрузках — ПП-Нп-30Х5Г2СМ, ПП-Нп-18Х1Г1М и др.; при трении металла о металл в коррозионной среде и при эрозивном изнашивании — ПП-Нп-10Х14Т, ПП-Нп-10Х17Н9С5ГТ и др.; при термической усталости и больших удельных давлениях — ПП-Нп-25Х5ФМС, ПП-35В9Х3СФ, ПП-Нп-35Х6М2 и др.; при трении металла о металл без смазки и при трении качения — ПП-Нп-14СТ, ПП-Нп-50Х3СТ и др.; при сильных ударах и высоких контактных нагрузках — ПП-Нп-90Г13Н4 и ПП-Нп-12Х12Г12СФ.

**Наплавочная холоднокатаная лента.** При антикоррозионной наплавке под флюсом используют холоднокатаные ленты. Содержание углерода в них не превышает 0,08 % при различном содержании хрома и никеля. Для повышения коррозионной стойкости металл стабилизируется титаном или ниобием. Для антикоррозионной наплавки производят ленты девяти типов. Например, ленты Св-04Х19Н11М3, Св-10Х16Н25АМ6, Св-08Х19Н10Г2Б, Св-07Х25Н13 выпускают согласно ТУ 14-1-1468-75. Для наплавки применяют ленты толщиной 0,4...1,0 мм и шириной 20...100 мм.

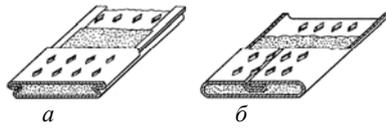


Рис. 3.87. Конструкции наплавочной порошковой ленты: *а* — однозамковая; *б* — двухзамковая

и двухзамковые (рис. 3.87). Порошковые ленты используются для наплавки под флюсом и для механизированной и автоматической наплавки открытой дугой.

Обозначение марки ленты состоит из индексов ПЛ (порошковая лента) и Нп (наплавочная) и следующих за ними цифр и букв, показывающих содержание углерода и легирующих элементов. Например, ленты ПЛ-Нп-300Х25СЗН2Г2 и ПЛ-Нп-400Х25СЗГ2М применяются для наплавки деталей дробилок, ножей бульдозеров, бил угольных мельниц и др.; ПЛ-Нп-15Х4В2М2, ПЛ-Нп-20Х4В2М2, ПЛ-Нп-20Х10Г10Т — для наплавки крановых колес, роликов и направляющих; ПЛ-Нп-12Х16Н9С5Г2Т и ПЛ-Нп-12Х16Н8М6С5Г4Б — для наплавки под флюсом деталей трубопроводной арматуры, работающей при температурах до 560 °С.

**Наплавочная спеченная лента.** Ленты изготавливают холодной прокаткой смеси порошков железа и сталей с добавлением к ним легирующих элементов в виде порошков металлов, ферросплавов, графита с последующим спеканием в водороде. Спеченную ленту производят толщиной 0,8...1,2 мм и шириной 30...60 мм (ГОСТ 22366-93). Преимуществом спеченной ленты является повышение производительности наплавки (на 25...30 % по сравнению с применением холоднокатаной ленты идентичного химического состава). Стандартом предусматривается изготовление 7-и марок спеченных лент для электрошлаковой наплавки и 10-и марок — для дуговой.

Обозначение марки ленты состоит из индекса ЛС (лента спеченная) и следующих за ним цифр и букв, показывающих содержание углерода и легирующих элементов.

В зависимости от вида изнашивания для нанесения покрытий используются различные марки спеченных лент. Например, для деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания, сопровождаемого ударными нагрузками (ножи бульдозеров, ножевые

диски плугов, детали грузовых автомобилей и др.), применяются спеченные ленты марок ЛС-70ХЗНМ и ЛС-70ХЗНМС; для деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, сопровождаемого умеренными ударными нагрузками (катки гусеничного хода, ножи бульдозеров и др.), — ЛС-У10Х7ГР1; для деталей, работающих в условиях трения металла о металл (крановые колеса, тормозные шкивы, катки и натяжные колеса гусеничных машин и др.), — ЛС-18ХГСА и ЛС-25ХГСА.

**Прутки для наплавки.** Прутки используются в качестве присадочного материала при газовой наплавке и дуговой наплавке в среде защитных газов. По ГОСТ 21449-75 производят литые прутки Пр-С27 (тип наплавленного металла У45Х28Н2СВМ), Пр-В3К (тип наплавленного металла У10ХК63В5), Пр-В3К-Р (тип наплавленного металла У20ХК57В10), используемые для наплавки деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания, ударных нагрузок, коррозии, эрозии при повышенных температурах или в агрессивных средах. Например, литые прутки марки Пр-С27 применяют для наплавки рабочих органов почвообрабатывающих и дорожных машин, зубьев ковшей экскаваторов и т. п.; Пр-В3К — для наплавки клапанов и седел двигателей внутреннего сгорания, уплотнительных поверхностей деталей энергетической, нефтяной арматуры, ножей и т. п.; Пр-В3К-Р — для наплавки режущего инструмента, зубьев рамных пил и т. п. Диаметр прутков для наплавки составляет 4, 5, 6 и 8 мм, длина — 300...500 мм.

**Порошки из сплавов для наплавки.** В зависимости от химического состава порошки из сплавов для наплавки изготавливают следующих марок (ГОСТ 21448-75): ПГ-С27 (тип наплавленного металла ПН-У40Х28Н2С2ВМ), ПГ-УС25 (тип наплавленного металла ПН-У50Х38Н), ПГ-ФБХ6-2 (тип наплавленного металла ПН-У45Х35ГСР), ПГ-АН1 (тип наплавленного металла ПН-У25Х30СР), ПГ-СР2 (тип наплавленного металла ПН-ХН80С2Р2), ПГ-СР3 (тип наплавленного металла ПН-ХН80С3Р3) и ПГ-СР4 (тип наплавленного металла ПН-ХН80С4Р4). В зависимости от гранулометрического состава порошки выпускаются следующих классов: крупный, средний, мелкий и очень мелкий с размерами частиц от 0,16 до 1,25 мм. Порошки используются для наплавки и напыления износостойкого слоя на детали машин и оборудования, работающие в условиях абразивного изнашивания, ударных нагрузок, коррозии, эрозии при повышенных температурах.

турах или в агрессивных средах. Например, порошки марок ПГ-С27 и ПГ-АН1 применяются для наплавки деталей металлургического и энергетического оборудования, сельскохозяйственных и строительных машин, работающих в условиях абразивного изнашивания при умеренных ударных нагрузках; ПГ-УС25 — для наплавки деталей сельскохозяйственных машин, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания без ударов; ПГ-СР2, ПГ-СР3 и ПГ-СР4 — для наплавки и напыления деталей уплотнительных поверхностей аппаратуры тепловых и атомных электростанций, подвергающихся интенсивному изнашиванию и воздействию агрессивных сред.

**Напыление** — процесс нанесения покрытия на поверхность детали с помощью высокотемпературной скоростной струи, содержащей частицы порошка или капли расплавленного напыляемого материала, осаждающиеся на основном металле при ударном столкновении с его поверхностью.

Первоначально напыление покрытий осуществляли с помощью истекающей из сопла горелки струи воздуха или нагретого газа, обеспечивающей мелкое распыление расплавленного металла и его осаждение на поверхности изделия. Этот способ впоследствии развился в технологию распыления жидких расплавов, широко используемую в современной порошковой металлургии. Первые газотермические покрытия были получены в начале XX в. М. У. Шоопом, который распылил расплавленный металл струей газа и, направив этот поток на образец — основу, получил на ней слой покрытия. По имени автора этот процесс называли шоопированием. Он был запатентован в Германии, Швейцарии, Франции и Англии. Конструкция первого газопламенного проволочного металлизатора Шоопа относится к 1912 г., а первого электродугового проволочного металлизатора — к 1918 г.

В СССР газовую металлизацию стали применять в конце 20-х гг. прошлого века, а в конце 30-х гг. она была успешно заменена электродуговой. Аппаратуру для электродуговой металлизации создали Н. В. Катц и Е. М. Линник.

Создание в конце 50-х гг. надежной техники генерирования низкотемпературной плазмы позволило разработать первые плазмотроны для нанесения покрытий из проволоки и порошков. Плазменное напыление резко повысило качество газотермических покрытий, поскольку появилась возможность в широких масштабах управлять энергетикой процесса и создавать покрытия практически из любых материалов.

Нанесение покрытий испарением и конденсацией в вакууме впервые было применено в 20-х гг. прошлого столетия для получения тонких пленок (от 1 до 10 нм) в оптике и радиотехнической промышленности.

Существуют два вида процесса напыления: газодинамическое и вакуумное (рис. 3.88). В первом случае напыление осуществляют

частицами порошкового материала размером 10...150 мкм. Во втором — образование покрытия происходит в вакууме при пониженном давлении за счет конденсации атомов или ионов напыляемого материала на поверхности изделия.



Рис. 3.88. Классификация процессов напыления

Методы газодинамического напыления подразделяются на холодное напыление и газотермическое.

**Холодное газодинамическое напыление (ХГДН)** осуществляется в специальной установке (рис. 3.89), где частицы порошка разгоняются воздушной струей до сверхзвуковой скорости, бомбардируют основу и образуют на ней слой покрытия. Транспортирующий поток (осушенный воздух) захватывает напыляемый порошок 1 в дозаторе барабанного типа 2. Концентрация порошка в потоке определяется производительностью дозатора, давлением и температурой транспортирующего потока. Напорный поток подогревается нагревателем 9 для регулирования скорости

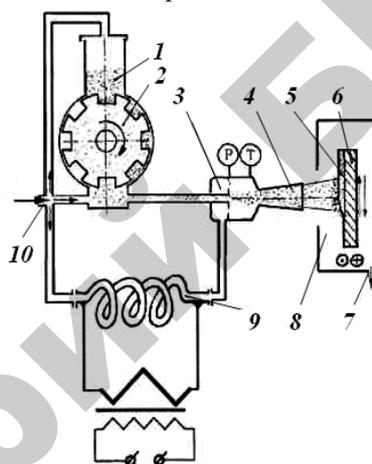


Рис. 3.89. Схема холодного газодинамического напыления: 1 — напыляемый порошок; 2 — дозатор-смеситель; 3 — форкамера; 4 — сверхзвуковое сопло; 5 — покрытие; 6 — обрабатываемая поверхность; 7 — откачка воздуха; 8 — камера; 9 — подогрев напорного потока; 10 — подача газа (воздуха)

напыления и компенсации снижения температуры на выходе из сверхзвукового сопла 4 вследствие расширения воздуха. Обработываемое изделие 6 размещается в пылеизолирующей камере 8. Особенностью метода ХГДН, выгодно отличающей его от газотермических методов, является полное отсутствие термического воздействия на основу и напыляемый порошок.

ХГДН позволяет наносить алюминиевые, медные, цинковые, оловянные, свинцовые, никелевые и керамические ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  и др.) покрытия практически любой толщины на металл, стекло, керамику, гранит, бетон и т. д.

ХГДН находит применение для нанесения защитных и антикоррозионных покрытий на стенки корпусов резервуаров для хранения и переработки нефтепродуктов, морских судов, автомобилей, конструкций мостов, гидротехнических сооружений, внутренних и наружных поверхностей трубопроводов, в том числе протекторная защита внутренней поверхности стыков магистральных трубопроводов; для нанесения жаростойких, теплозащитных и антифрикционных покрытий на детали энергетического, машиностроительного и других видов оборудования.

При нанесении покрытий *газотермическим напылением* материал покрытия подвергают нагреву и плавлению каким-либо источником теплоты, а затем диспергируют и разгоняют газовым потоком. На поверхность изделия или основы напыляемый материал поступает в диспергированном состоянии в виде мелких расплавленных или пластифицированных частиц, которые, ударяясь об нее, деформируются и закрепляются, накладываясь одна на другую, и образуют слоистое покрытие.

В зависимости от источника теплоты различают следующие методы газотермического нанесения покрытий: электродуговую металлизацию, газопламенное, детонационное и плазменное напыление.

Сущность *электродуговой металлизации* заключается в непрерывной подаче металлической проволоки, ее расплавлении электрической дугой, диспергировании расплавленного металла в жидкие частицы и их нанесении высокоскоростной газовой струей на заранее подготовленную поверхность детали. На рисунке 3.90 приведена схема процесса электродуговой металлизации. Две проволоки 1, предназначенные для расплавления, непрерывно подаются в направляющие наконечники 3 при помощи роликов подающего

механизма 2. Концы проволок, выходя из наконечников, пересекаются и расплавляются в электрической дуге 4. Струя сжатого воздуха под давлением 0,4...0,7 МПа выходит из сопла 7 и распыляет металл на частицы, размеры которых в зависимости от режима металлизации и свойств распываемого металла могут колебаться в диапазоне 10...70 мкм. Частицы, двигаясь в струе воздуха со скоростью 75...200 м/с, попадают на поверхность основного металла 6, образуя слой покрытия 5 толщиной до 15 мм и более.

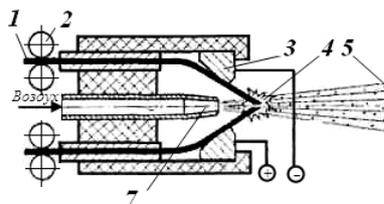


Рис. 3.90. Схема процесса электродуговой металлизации

Данный метод применяют для восстановления таких деталей, как коленчатые валы двигателей, тормозные барабаны, тормозные диски, диски сцеплений, головки блока цилиндров, шатуны двигателей, гильзы цилиндров, валы роторов и статоров электродвигателей, блоки цилиндров и др.

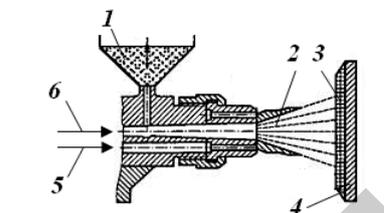


Рис. 3.91. Схема процесса газопламенного напыления: 1 — напыляемый порошок; 2 — факел; 3 — покрытие; 4 — обрабатываемая поверхность; 5 — смесь горючего газа и кислорода; 6 — транспортирующий газ (азот)

При газопламенном напылении металлический порошок или проволока подаются в ацетиленокислородное пламя, в котором они расплавляются и, увлекаемые потоком газов, наносятся на поверхность детали.

Схема процесса газопламенного напыления металлического порошка показана на рисунке 3.91. Горючий газ и кислород 5 подают в смесительную камеру, из которой горячая смесь поступает в сопловое устройство и далее поджигается на выходе из него, образуя факел газового пламени 2.

Напыляемый порошок 1 подают по оси газопламенной струи. Такой способ подачи способствует более интенсивному нагреву напыляемого материала и его распылению.

С помощью газопламенного напыления наносят износостойкие и коррозионно-стойкие покрытия из железных, никелевых, медных,

алюминиевых, цинковых сплавов, баббитовые покрытия подшипников скольжения, электропроводные, электроизоляционные и декоративные покрытия. Газопламенное напыление широко применяется для восстановления деталей автотракторной техники, насосно-компрессорного оборудования, крышек и валов электродвигателей и др.

Для нанесения покрытия *плазменным напылением* металлический порошок или проволоку (в отличие от плазменной наплавки) вводят непосредственно в струю плазменного столба дуги, где они расплавляются и, увлекаемые потоком плазмы, наносятся на поверхность детали.

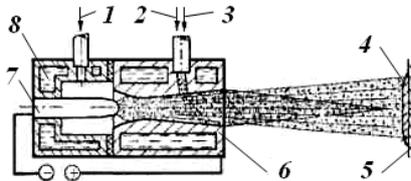


Рис. 3.92. Схема процесса плазменного порошкового напыления: 1 — плазмообразующий газ; 2 — напыляемый порошок; 3 — транспортирующий газ; 4 — покрытие; 5 — обрабатываемая поверхность; 6 — медный анод; 7 — вольфрамовый катод; 8 — система охлаждения

В дуговых плазменных распылителях (рис. 3.92) порошок подают в различные участки плазменного распылителя: в плазменную струю выше среза сопла, на срез сопла или непосредственно в сопло. При высокой энтальпии плазменной струи порошок успевает прогреться при его подходе к срезу сопла.

В отличие от наплавки процесс плазменного напыления характеризуется большей концентрацией теплового потока и высокой скоростью течения плазменной струи. При плазменном напылении в качестве материалов покрытия применяются тугоплавкие металлы (вольфрам, молибден, тантал и др.) или оксиды металлов ( $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $ZrO_2$ ), силициды ( $MoSi_2$  и др.), карбиды ( $W_4C$ ,  $SiC$ ), бориды ( $ZnB_2$ ,  $HfB_2$ ), обладающие высокой температурой плавления.

Плазменное напыление применяется в авиации и тепловой энергетике для создания термобарьерных и уплотнительных покрытий газотурбинных двигателей, износостойких и антифрикционных покрытий деталей шасси, гидравлики, в атомной энергетике для создания электроизоляционных и защитных покрытий, в нефтедобыче, металлургии, транспортном машиностроении и многих других отраслях.

Для нанесения покрытий *детонационным напылением* напыляемый порошок предварительно нагревают и с большим ускорением

наносит на напыляемую деталь с помощью продуктов детонации, образующихся в результате взрыва газокислородного топлива. В качестве горючих газов обычно применяются ацетилен и пропанобутановая смесь.

Детонационное напыление является циклическим процессом, заключающимся в многократном осуществлении следующих последовательных операций: заполнение взрывчатой газовой смесью ствола детонационной пушки, подача в ствол пушки порошка, взрыв газовой смеси в стволе и нанесение напыляемых частиц с большой скоростью на поверхность детали.

Установка для детонационного напыления (рис. 3.93) состоит из блока подачи напыляющего порошка 4, включающего порошковый питатель и дозирующее устройство; газовой камеры 1, служащей для образования требуемых газовых смесей и заполнения ими ствола детонационной установки с заданной скоростью и периодичностью; блока поджига 3 и свечи зажигания 2, предназначенных для инициирования взрыва рабочей газовой смеси; ствола 5, предназначенного для направленного распространения взрывной волны с напыляемыми частицами в сторону его открытого конца и представляющего собой трубу диаметром 20...50 мм, длиной 1,0...2,5 м.

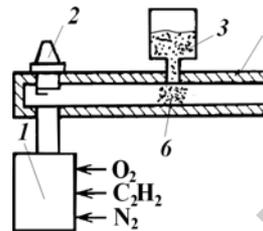


Рис. 3.93. Схема процесса детонационного напыления

и свечи зажигания 2, предназначенных для инициирования взрыва рабочей газовой смеси; ствола 5, предназначенного для направленного распространения взрывной волны с напыляемыми частицами в сторону его открытого конца и представляющего собой трубу диаметром 20...50 мм, длиной 1,0...2,5 м.

Процесс детонационного напыления осуществляется следующим образом. Из газовой камеры 1 ствол 4 заполняется смесью газов ( $C_2H_2$  и  $O_2$ ), способных детонировать. Одновременно в ствол 4 из блока подачи 3 с помощью дозирующего устройства заданной порцией подают напыляемый порошок и с помощью свечи 2 поджигают газовую смесь. В результате воспламенения происходит взрыв горючей смеси с выделением значительного количества теплоты и образованием детонационной волны, которая ускоряет напыляемые частицы 6 и переносит их через ствол на поверхность детали 5.

В течение одного цикла (0,2...0,5 с) на поверхность детали наносится 30...40 мг напыляемого порошка. Частота циклов может достигать 8...10 Гц, но в большинстве случаев она равна 3...4 Гц. Последующий цикл осуществляется после предварительной про-

дувки азотом ( $N_2$ ), которая исключает возможность самопроизвольного воспламенения новой порции горючей смеси ( $C_2H_2$  и  $O_2$ ) при ее контакте с предыдущими продуктами детонации. При детонационном напылении скорость частиц достигает значений 600...1 000 м/с, в то время как при плазменном — 100...200 м/с.

Методом детонационного напыления наносят покрытия из порошков различных металлов, сплавов, оксидов, тугоплавких соединений и их различных композиций.

Детонационное напыление применяют в авиационной промышленности для упрочнения газовых турбин авиадвигателей, сопловых аппаратов турбин вертолетных двигателей; в машиностроении — для упрочнения и восстановления посадочных мест под подшипники, колес-шестерен, днищ поршней и поверхностей камер сгорания, распределительных и коленчатых валов, блоков цилиндров двигателей; в химической промышленности — для упрочнения деталей, работающих в концентрированных растворах щелочей, а также для упрочнения и восстановления различного инструмента и технологической оснастки — пресс-форм литья под давлением, штампов, ножей фрез, подающих роликов сварочных автоматов, сопел сварочных горелок.

Методы вакуумного напыления подразделяются на метод термического испарения, катодное распыление и ионно-плазменное осаждение. Эти методы используются для нанесения тонких пленок и покрытий толщиной от 0,05 до 75 мкм.

Метод *термического испарения* заключается в нагреве исходных материалов до температуры их испарения, испарении этих материалов и конденсации паров на поверхности обрабатываемого материала. Нагрев испаряемых материалов может осуществляться прямым пропусканием электрического тока, непосредственно в тигле с помощью индуктора, электродугового разряда, электронного или лазерного луча.

Схема установки для нанесения покрытий методом термического испарения представлена на рисунке 3.94. Рабочая камера 1 вакуумной установки представляет собой цилиндрический металлический или стеклянный колпак, который устанавливается на опорной плите 7. Внутри рабочей камеры расположены подложка 4, которая закрепляется на держателе 3, нагреватель подложки 2 и испаритель 6 с напыляемым материалом. Между испарителем и подложкой

устанавливается заслонка 5, позволяющая в нужный момент прекращать попадание испаряемого вещества на подложку.

Процесс термического испарения осуществляют в вакууме при давлении порядка  $10^{-3} \dots 10^{-5}$  Па, при котором длина свободного пробега атомов или молекул составляет несколько метров. Полученная в результате нагрева паровая фаза напыляемого материала свободно осаждается на подложку, имеющую значительно более низкую температуру, чем температура паровой фазы. Для большинства материалов рабочие температуры испарения находятся в пределах  $1\ 100 \dots 2\ 600$  °С.

Метод **катодного распыления** основан на использовании плазмы тлеющего разряда в вакууме. Принципиальная схема установки катодного распыления представлена на рисунке 3.95. В вакуумную камеру 1, содержащую анод 2 и катод 6, где давление составляет  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  Па, подают инертный газ (обычно, аргон) под давлением  $1 \dots 10$  Па. Для зажигания тлеющего разряда между катодом и анодом создают напряжение  $1 \dots 5$  кВ. Положительные ионы инертного газа, источником которых является плазма тлеющего разряда, ускоряются в электрическом поле и бомбардируют распыляемый материал 5. Распыленные атомы попадают на подложку 3 и оседают в виде тонкого покрытия.

**Ионно-плазменное осаждение** является дальнейшим развитием метода термического испарения. При ионно-плазменном осажде-

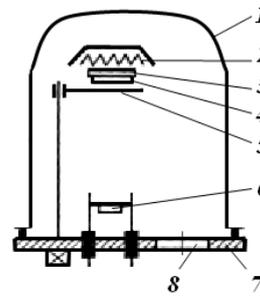


Рис. 3.94. Схема установки вакуумного напыления покрытий методом термического испарения: 1 — рабочая камера; 2 — нагреватель подложки; 3 — держатель; 4 — подложка; 5 — заслонка; 6 — испаритель; 7 — опорная плита; 8 — отверстие для вакуумирования

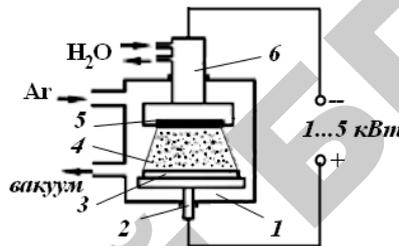


Рис. 3.95. Принципиальная схема катодного распыления: 1 — вакуумная камера; 2 — анод; 3 — подложка; 4 — зона плазмы тлеющего разряда; 5 — распыляемый материал; 6 — катод

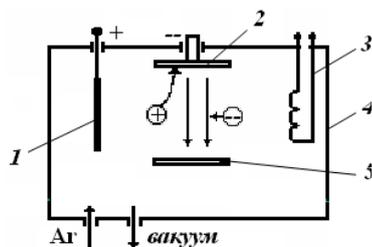


Рис. 3.96. Принципиальная схема ионно-плазменного осаждения:  
 1 — анод; 2 — катод-мишень;  
 3 — термокатод; 4 — рабочая камера; 5 — подложка

нии (рис. 3.96) в систему анод 1 – катод-мишень 2 (с напыляемым материалом) вводят вспомогательный источник электронов (термокатод 3). Перед началом работы в рабочей камере 4 создается вакуум при давлении порядка  $10^{-4}$  Па и на термокатод 3 подается ток, достаточный для его разогрева и создания термоэлектронного тока (термоэлектронная эмиссия). После разогрева термокатода 3 рабочую камеру наполняют инертным газом (аргоном) под давлением  $10^{-1} \dots 10^{-2}$  Па. Между анодом

1 и термокатодом 3 возникает напряжение порядка 200 В, инициирующее возникновение плазменного тлеющего разряда. При подаче напряжения 3...5 кВ на катод-мишень 2, положительные ионы, возникающие вследствие ионизации инертного газа электронами, бомбардируют распыляемый материал катод-мишени 2. Распыленные атомы попадают на подложку 5 и оседают в виде тонкого покрытия.

Вакуумное напыление покрытий широко применяют в различных областях техники. Вакуумным напылением создаются износостойкие, коррозионно-стойкие, жаростойкие покрытия, работающие в условиях ионизирующего излучения и в условиях комбинированного воздействия агрессивных сред. Такие покрытия применяют на изделиях различного назначения: парах трения, прессовом, режущем инструменте, деталях пищевой и перерабатывающей промышленности, в радиоэлектронике, оптике и др. Работы, проведенные в США по напылению покрытий на наиболее ответственные и тяжело нагруженные детали двигателей, позволили повысить моторесурс газотурбинных двигателей с 5 000...8 000 до 16 000...20 000 часов, а дизельных двигателей — с 5 000...6 000 до 10 000...12 000 часов. Срок службы инструмента с покрытиями повышается в 2...8 раз. Ресурс струйных агрегатов увеличивается в 2...4 раза, а эксплуатационные характеристики золотниковых пар повышаются в 2...3 раза.

*Преимущества* вакуумного напыления заключаются в высоких физико-механических свойствах покрытий, возможности получения покрытий из синтезированных соединений (карбидов, нитридов, оксидов и др.), а также нанесения тонких и равномерных покрытий,

использования для напыления широкого класса неорганических материалов. Технологические процессы, связанные с вакуумным напылением, не загрязняют окружающую среду и не нарушают экологию. В этом отношении они выгодно отличаются от химических и электролитических методов нанесения тонких покрытий.

### Вопросы для самоконтроля

1. Сущность процесса электрошлаковой сварки. Преимущества, недостатки и области применения электрошлаковой сварки.
2. Сущность процесса плазменной сварки. Оборудование, применяемое при плазменной сварке. Преимущества, недостатки и области применения плазменной сварки.
3. Сущность процессов электронно-лучевой и лазерной сварки. Оборудование, применяемое для электронно-лучевой и лазерной сварки. Преимущества, недостатки и области применения электронно-лучевой и лазерной сварки.
4. Сущность процесса термитной сварки. Материалы, применяемые при термитной сварке. Преимущества, недостатки и области применения термитной сварки.
5. Сущность процесса сварки трением. Преимущества, недостатки и области применения сварки трением.
6. Сущность процесса холодной сварки. Классификация видов холодной сварки. Преимущества, недостатки и области применения холодной сварки.
7. Сущность процесса ультразвуковой сварки. Оборудование, применяемое при ультразвуковой сварке. Преимущества, недостатки и области применения ультразвуковой сварки.
8. Сущность процесса диффузионной сварки. Оборудование, применяемое при диффузионной сварке. Преимущества, недостатки и области применения диффузионной сварки.
9. Сущность процесса сварки взрывом. Материалы, применяемые при сварке взрывом. Преимущества, недостатки и области применения сварки взрывом.
10. Сущность процесса печной сварки. Виды печной сварки. Области применения, преимущества и недостатки печной сварки.
11. Сущность процесса пайки металлов. Классификация способов, материалы и оборудование, используемые при пайке.

12. Сущность процесса магнитно-импульсной сварки. Основные схемы магнитно-импульсной сварки. Преимущества, недостатки и области применения магнитно-импульсной сварки.

13. Сущность процессов высокочастотной индукционной и высокочастотной контактной сварки. Преимущества, недостатки и области применения высокочастотной сварки.

14. Сущность процесса термической резки металлов. Классификация способов термической резки. Преимущества, недостатки и области применения термической резки.

15. Сущность процесса наплавки и напыления металлов. Классификация способов, материалы и оборудование, используемые при наплавке и напылении.

## МАТЕРИАЛЫ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

### Лабораторная работа 1. ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

**Цель работы.** Ознакомиться с физическими основами сварки. Изучить строение и структуру сварного соединения, формируемого при электродуговой сварке углеродистых сталей.

**Подготовка студента к занятию.** Изучить следующие вопросы теоретического материала:

1. Физические основы сварки.
2. Сущность способов сварки плавлением.
3. Дуговые методы сварки.
4. Закономерности формирования сварного соединения при ручной дуговой сварке.

5. Строение сварного соединения. Зона термического влияния.

**Средства обучения.** *Оборудование и инструменты:* металлографический микроскоп МИМ-7 (МИМ-8), микроскоп МПБ-2, твердомер ТК-2. *Материалы:* набор шлифов сварных соединений образцов из углеродистых сталей (20, 30, 45) для изучения их макро- и микроструктуры.

#### Порядок выполнения лабораторной работы

##### 1. Макроструктурный анализ сварного соединения.

Для проведения макроструктурных исследований студенты используют набор макрошлифов сварных соединений образцов из углеродистых сталей (шлифованные образцы сварных соединений, протравленные 10 %-ным водным раствором азотной кислоты). Макроисследование проводят визуально или с использованием микроскопа МПБ-2.

В результате макроструктурного исследования студенты определяют форму и размеры шва, площадь и форму провара основного металла, направленность, рост и размеры кристаллитов, размеры и форму околошовной зоны, наличие в соединении непроваров, трещин, пор, шлаковых включений, химической неоднородности и т. п.

##### 2. Микроструктурный анализ сварного соединения.

Для проведения микроструктурных исследований студенты используют набор микрошлифов сварных соединений образцов из

углеродистых сталей (шлифованные и полированные образцы сварных соединений, протравленные 4 %-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте). Микроисследование проводят с помощью металлографического микроскопа МИМ-7 (МИМ-8).

В результате микроструктурного исследования студенты определяют строение и структуру металла шва и зоны термического влияния, размеры и форму зерен, а также наличие дефектов (перегрев и пережог металла, микропоры и микротрещины).

### **3. Определение твердости сварного соединения.**

На твердомере ТК-2 студенты определяют твердость металла шва и различных участков зоны термического влияния. Количество измерений твердости на каждом участке должно быть не менее трех. За конечный результат берется среднее арифметическое всех замеров твердости на каждом участке.

### **4. Оформление результатов работы.**

Зарисовать общее строение сварного соединения (макроструктура соединения). Схематично отметить на рисунке наличие дефектов: непровары, трещины, поры, шлаковые включения и т. п.

Зарисовать микроструктуру сварного соединения. Отметить на рисунке сварной шов и участки зоны термического влияния, а также оценить размеры этих участков.

Построить зависимость изменения твердости по длине от центра сварного шва до основного металла.

В отчете студенты делают выводы о качестве сварного соединения.

### **Вопросы для текущего контроля** (к защите лабораторной работы)

1. Привести классификацию видов и способов сварки.
2. Описать процесс ручной дуговой сварки плавящимся электродом.
3. Описать условия кристаллизации сварочной ванны и кристаллическое строение металла шва.
4. Пользуясь диаграммой состояния Fe-Fe<sub>3</sub>C (рис. 3.6), объяснить строение зоны термического влияния в сварном соединении.
5. Объяснить изменение значений твердости на различных участках сварного соединения.

## Лабораторная работа 2. РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

**Цель работы.** Научиться выбирать режимы точечной сварки. Получить навыки оценки качества сварного соединения, полученного этим методом.

**Подготовка студента к занятию.** Изучить следующие вопросы теоретического материала:

1. Сущность способов сварки давлением.
2. Классификация способов контактной сварки.
3. Сущность контактной точечной сварки.
4. Режимы контактной точечной сварки.

**Средства обучения.** *Оборудование и инструменты:* машина для контактной точечной сварки МТ-501, разрывная машина УММ-5, штангенциркуль (цена деления 0,1 мм). *Материалы:* образцы из низкоуглеродистой стали.

### Порядок выполнения лабораторной работы

#### 1. Выбор режимов точечной сварки.

Основными параметрами, определяющими режимы точечной сварки, являются диаметр стержневого электрода  $d$ , сила тока  $I$ , усилие сжатия  $P$  и время протекания процесса  $\tau$ , которые зависят от толщины свариваемых изделий  $h$ . Расчетными методами установлено, что при точечной сварке зависимость основных режимов от толщины свариваемого металла носит линейный характер. Это позволяет при назначении режимов сварки пользоваться таблицами, которые разработаны для основных групп металлов, встречающихся на практике. Основные параметры режимов точечной сварки низкоуглеродистых сталей представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8

Режимы точечной сварки низкоуглеродистых сталей

$h$ , мм	$d$ , мм	$I$ , кА	$\tau$ , с	$P$ , кН
1	2	3	4	5
0,5	4	6...7	0,08...0,1	1,2...1,8
0,8	5	7...8,5	0,1...0,14	2...2,8

Окончание таблицы 3.8

1	2	3	4	5
1,0	5	8,5...9,5	0,12...0,16	2,5...3
1,2	6	9,5...10,5	0,12...0,2	3...4
1,5	7	11...12	0,16...0,24	4...5
2,0	8	12...13	0,2...0,32	6...7
3,0	10	14...15	0,3...0,48	9...10
4,0	12	18...19	0,7...0,9	13...15

Согласно выданному индивидуальному заданию (табл. 3.9) студенты выбирают основные режимы точечной сварки (диаметр стержневого электрода  $d$ , силу тока  $I$ , усилие сжатия  $P$  и время протекания процесса  $\tau$ ) в зависимости от толщины свариваемых изделий  $h$ .

Таблица 3.9

Варианты индивидуальных заданий

Номер варианта	Толщина образца $h$ , мм	Марка стали	Номер варианта	Толщина образца $h$ , мм	Марка стали
1	0,5	08	16	4,0	08
2	0,8	10	17	0,5	10
3	1,0	15	18	0,8	15
4	1,2	20	19	1,0	20
5	1,5	25	20	1,2	25
6	2,0	08	21	1,5	10
7	3,0	10	22	2,0	15
8	4,0	15	23	3,0	20
9	0,5	20	24	0,5	25
10	0,8	25	25	0,8	08
11	1,0	08	26	1,0	10
12	1,2	10	27	1,2	15
13	1,5	15	28	1,5	20
14	2,0	20	29	2,0	25
15	3,0	25	30	3,0	08

## 2. Изготовление экспериментальных образцов.

Студенты, подготавливая образцы для сварки, собирают их внахлестку (величина нахлестки  $B$  определяется в соответствии с рис. 3.97) и зажимают с усилием  $P$  между двумя электродами диаметром  $d$ , подводящими ток силой  $I$  к месту сварки. Настройку сварочной машины на выбранные по индивидуальному заданию значения параметров режимов точечной сварки ( $d$ ,  $P$ ,  $I$  и  $\tau$ ) осуществляет учебный мастер. Студенты самостоятельно осуществляют процесс точечной сварки.

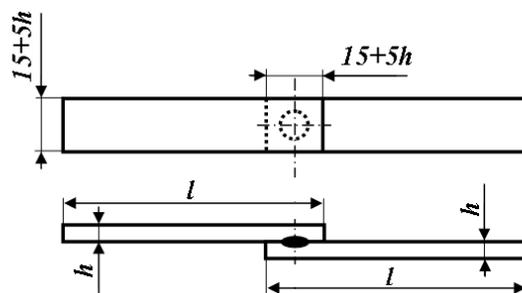


Рис. 3.97. Вид нахлестки сварного соединения, выполненного контактной точечной сваркой

## 3. Оценка качества сварного соединения.

Высокая прочность сварного соединения является его основным показателем качества. Наибольшее влияние на прочность точечных соединений оказывает диаметр сварной точки.

Сварные соединения, выполненные точечной сваркой, испытывают на срез путем растяжения образца. При испытании определяют нагрузку  $F$ , предшествующую разрушению образца (сварной точки).

На разрывной машине УММ-5 студенты, подвергая растяжению полученные экспериментальные образцы, определяют разрушающую нагрузку  $F$ .

Сварные соединения считают доброкачественными, если выполняется условие

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{F}{S} \geq \bar{\tau}_{\text{ср}},$$

где  $\tau_{\text{ср}}$  — действительное напряжение при срезе, возникающее в сварной точке под действием разрушающей нагрузки  $F$ ;  $S$  — площадь сварной точки;  $\bar{\tau}_{\text{ср}}$  — допустимое напряжение при срезе, определяемое из выражения

$$\bar{\tau}_{\text{ср}} = 0,75\sigma_{\text{T}},$$

где  $\sigma_{\text{T}}$  — предел текучести материала (табл. 3.10).

Таблица 3.10

Предел текучести низкоуглеродистых качественных сталей					
Марка стали	08	10	15	20	25
Предел текучести $\sigma_{\text{T}}$ , МПа	196	205	225	245	275

Согласно вышеприведенной методике студенты рассчитывают действительное  $\tau_{\text{ср}}$  и допустимое  $\bar{\tau}_{\text{ср}}$  напряжение при срезе, сравнивают полученные значения и делают вывод о качестве полученного сварного соединения.

#### 4. Оформление результатов работы.

Значения выбранных по индивидуальному заданию параметров режимов точечной сварки, а также величину нахлестки экспериментальных образцов студенты заносят в таблицу 3.11. Полученные при проведении оценки качества сварного соединения результаты расчетов студенты заносят в таблицу 3.12.

Таблица 3.11

Толщина образцов	Режимы сварки				$B$ , мм
	$d$ , мм	$I$ , кА	$P$ , Н	$\tau$ , с	

Таблица 3.12

Оценка качества сварного соединения					
Марка стали	Предел текучести $\sigma_{\text{T}}$ , МПа	Площадь сварной точки $S$ , мм <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка $F$ ,	Действительное напряжение при срезе $\tau_{\text{ср}}$ , МПа	Допустимое напряжение при срезе $\bar{\tau}_{\text{ср}}$ , МПа

По полученным результатам расчетов следует сделать выводы о качестве сварного соединения, полученного точечной сваркой.

**Вопросы для текущего контроля**  
(к защите лабораторной работы)

1. Определение контактной сварки.
2. Виды контактной сварки.
3. Определение точечной сварки.
4. Общая характеристика процесса точечной сварки.
5. Параметры режимов точечной сварки: «жесткий» и «мягкий».
6. Циклограммы процесса контактной сварки.
7. Оценка качества сварного соединения, полученного точечной сваркой.

### Лабораторная работа 3. АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАЯНОГО СОЕДИНЕНИЯ

**Цель работы.** Проанализировать структуру и механические свойства паяного соединения, сравнить с соединением, полученным точечной сваркой.

**Подготовка студента к занятию.** Изучить следующие вопросы теоретического материала:

1. Сущность процесса пайки.
2. Основные способы пайки.
3. Материалы, применяемые для пайки.
4. Основное оборудование, применяемое для получения паяных соединений.
5. Структура паяного соединения.

**Средства обучения.** *Оборудование и инструменты:* паяльник, разрывная машина УММ-5, микроскоп МИМ-7 (МИМ-8), штангенциркуль. *Материалы:* припой ПОС 40, флюс (хлористый цинк), образцы из низкоуглеродистой стали, микрошлифы паяного соединения и соединения, полученного точечной сваркой.

#### Порядок выполнения лабораторной работы

##### 1. Изготовление экспериментальных образцов.

Студенты изготавливают экспериментальные образцы соединения, полученного точечной сваркой (лаб. раб. 2).

Для изготовления экспериментальных образцов паяных соединений студенты используют легкоплавкий припой ПОС 40 и хлористый цинк в качестве флюса. Нагрев осуществляют паяльником.

Величину нахлестки паяного соединения выбирают равной величине нахлестки соединения, полученного точечной сваркой.

##### 2. Изучение микроструктуры паяного и сварного соединений.

Для проведения микроструктурных исследований студенты используют набор микрошлифов сварного и паяных соединений образцов из низкоуглеродистых сталей. Микроисследования проводят с помощью металлографического микроскопа МИМ-7 (МИМ-8).

##### 3. Определение прочности паяного и сварного соединений.

Паяные соединения и соединения, выполненные точечной сваркой, испытывают на срез путем растяжения образца. На разрывной машине

УММ-5 студенты, подвергая растяжению полученные экспериментальные образцы, определяют нагрузку  $F$ , предшествующую их разрушению, и рассчитывают предел прочности при срезе  $\tau_{ср}$  по формуле

$$\tau_{ср} = \frac{F}{S},$$

где  $S$  — площадь сварной точки (при точечной сварке) или площадь контактной поверхности (при пайке).

#### 4. Оформление результатов работы.

Зарисовать общее строение сварного и паяного соединений. Схематично отметить на рисунке паяного соединения основные зоны (паяный шов, диффузионная зона, зона термического влияния, спай, паяемый материал).

Данные испытаний на прочность паяного и сварного соединений студенты заносят в таблицы 3.13 и 3.14.

Таблица 3.13

Результаты определения прочности паяного соединения

Марка стали	Тип припоя, марка	Площадь контактной поверхности $S$ , мм <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка $F$ , Н	Предел прочности при срезе $\tau_{ср}$ , МПа
	ПОС 40			

Таблица 3.14

Результаты определения прочности сварного соединения

Марка стали	Диаметр электродов $d$ , мм	Площадь сварной точки $S$ , мм <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка $F$ , Н	Предел прочности при срезе $\tau_{ср}$ , МПа

Сравнивая полученные значения пределов прочности полученных соединений студенты делают вывод о качестве паяного соединения.

#### Вопросы для текущего контроля

(к защите лабораторной работы)

1. Типы паяных соединений.
2. Виды припоев и флюсов, используемых при пайке.
3. Нагревательное оборудование, применяемое при пайке.
4. Строение паяного соединения.

## МАТЕРИАЛЫ К УПРАВЛЯЕМОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

### Тема «РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ СВАРНОГО УЗЛА»

В соответствии с индивидуальным заданием (табл. 3.15) студенты рассчитывают режимы, выбирают материалы и оборудование для ручной дуговой сварки в следующей последовательности.

1. Выполнить эскиз сварного узла и определить тип сварного соединения.
2. Определить площадь поперечного сечения и объем сварного шва, массу наплавленного металла шва и общую массу наплавленного металла.
3. Выбрать диаметр электрода.
4. Выбрать тип и марку электрода.
5. Определить силу сварочного тока и напряжение на дуге.
6. Выбрать оборудование для сварки.
7. Определить скорость сварки.
8. Определить время сварки.
9. Определить расход электродов и электроэнергии.
10. Составить маршрутную карту технологического процесса ручной дуговой сварки.

#### **Определение типа сварного соединения.**

По чертежу сварного узла определить типы сварных соединений.

Согласно ГОСТ 5264-80, который устанавливает основные типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений из сталей, а также сплавов на железоникелевой и никелевой основах, выполняемые ручной электродуговой сваркой, эти соединения имеют следующие условные обозначения:

- С1...С40 — стыковые;
- У1...У10 — угловые;
- Т1...Т5 — тавровые;
- Н1...Н2 — нахлесточные.

## Варианты индивидуальных заданий

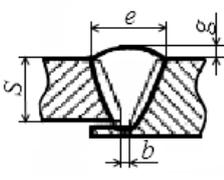
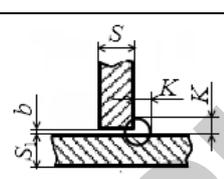
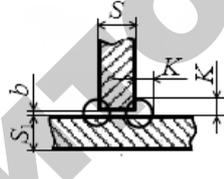
Но- мер вар.	Марка стали	Кол-во сварных узлов	Эскиз сварного узла
1	Ст2	5	<p>ГОСТ 5264-80-T1-Δ4 ГОСТ 5264-80-T3-Δ3</p> <p>180 110 190</p> <p>18 M27 №1</p> <p>Корпус гидроцилиндра: 1 — корпус; 2 — фланец; 3 — штуцер</p>
2	Ст3	6	
3	Ст5	7	
4	20	8	
5	30	9	
6	09Г2С	10	
7	16ГС	1	
8	Ст3	2	<p>ГОСТ 5264-80-C20 ГОСТ 5264-80-T1-Δ5</p> <p>160 130 60 55 12 125</p> <p>Корпус крана: 1 — втулка; 2 — крышка; 3 — кольцо</p>
9	Ст5	3	
10	10	4	
11	20	5	
12	25	6	
13	10Г2	7	
14	16ГС	8	

1	2	3	4
15	Ст2	9	<p>ГОСТ 5264-80-T1-Δ4</p> <p>ГОСТ 5264-80-T1-Δ5</p> <p>Груба 3/4"</p> <p>Корпус крана: 1 — плита; 2 — переходник; 3 — фланец; 4 — штуцер; 5 — запор</p>
16	Ст3	10	
17	Ст4	1	
18	20	2	
19	40	3	
20	09Г2	4	
21	10Г2	5	
22	Ст3	6	<p>ГОСТ 5264-80-T3-Δ6</p> <p>ГОСТ 5264-80-T1-Δ6</p> <p>Кронштейн: 1 — щека; 2 — направляющая; 3 — косынка</p>
23	Ст5	7	
24	08	8	
25	15	9	
26	35	10	
27	10Г2	1	
28	16ГС	2	

**Определение площади поперечного сечения и объема сварного шва, массы наплавленного металла шва и общей массы наплавленного металла.**

По форме поперечного сечения сварные швы подразделяют на стыковые и угловые (рис. 3.2). Стыковые швы применяют при выполнении стыковых соединений, угловые — при выполнении угловых, нахлесточных и тавровых соединений. Конструктивные элементы сварных швов и их размеры представлены в таблице 3.16 (ГОСТ 5264-80).

Таблица 3.16

Условное обозначение соединения	Конструктивные элементы сварного шва	Конструктивные элементы сварных швов			
		Размеры, мм			
		$S$	$b$	$e$	$g$
С20		3...5	3	10 <sup>+2,0</sup> <sub>-2,0</sub>	0,5 <sup>+1,5</sup> <sub>-0,5</sub>
		5...8		16 <sup>+2,0</sup> <sub>-2,0</sub>	
		8...11	4	20 <sup>+2,0</sup> <sub>-2,0</sub>	
		11...14		24 <sup>+2,0</sup> <sub>-2,0</sub>	
		14...17	5	28 <sup>+3,0</sup> <sub>-3,0</sub>	0,5 <sup>+2,0</sup> <sub>-0,5</sub>
		17...20		32 <sup>+3,0</sup> <sub>-3,0</sub>	
		20...24		36 <sup>+3,0</sup> <sub>-3,0</sub>	
		24...28		40 <sup>+3,0</sup> <sub>-3,0</sub>	
28...32	44 <sup>+3,0</sup> <sub>-3,0</sub>				
Т1		2...3	0 <sup>+1</sup>	—	—
		3...15	0 <sup>+2</sup>	—	—
		15...40	0 <sup>+3</sup>	—	—
Т3		2...3	0 <sup>+1</sup>	—	—
		3...15	0 <sup>+2</sup>	—	—
		15...40	0 <sup>+3</sup>	—	—

Площадь поперечного сечения сварных швов  $F_n$  рассчитываем по формулам:

для стыкового

$$F_n = 0,75eg + S b; \quad (3.1)$$

для углового

$$F_n = \frac{K^2}{2} K_y, \quad (3.2)$$

где  $e, g, S, b$  — конструктивные параметры шва (табл. 3.16);  $K$  — катет шва (в условном обозначении сварного соединения на чертеже);  $K_y$  — коэффициент усиления шва (табл. 3.17).

Таблица 3.17

Зависимость коэффициента усиления шва от величины катета шва

$K, \text{ мм}$	3...4	5...6	7...10	12...20
$K_y$	1,5	1,35	1,25	1,15

Объем наплавленного металла сварного шва  $V_n$  рассчитываем по формуле

$$V_n = F_n l, \quad (3.3)$$

где  $l$  — длина шва.

Массу наплавленного металла шва  $G_n$  определяем из выражения

$$G_n = V_n \gamma, \quad (3.4)$$

где  $\gamma$  — плотность свариваемого материала.

Общую массу наплавленного металла  $G_{\text{общ}}$  определяем по формуле

$$G_{\text{общ}} = n G_n, \quad (3.5)$$

где  $n$  — количество сварных узлов.

### Выбор диаметра электрода.

При получении стыковых швов диаметр электрода рассчитываем по формуле

$$d = \frac{S}{2} + 1,$$

где  $S$  — толщина свариваемых изделий.

При получении угловых швов диаметр электрода обычно выбирается в зависимости от величины катета шва  $K$  (табл. 3.18).

Таблица 3.18

Рекомендованные значения диаметра электродов для получения угловых швов

$K$ , мм	2	3	4	5	6...8
$d$ , мм	1,6; 2,0	2,5; 3,0	3,0; 4,0	4,0; 5,0	6,0

### Выбор типа и марки электрода.

Тип электрода выбираем, учитывая равнопрочность материалов сварного соединения и сварочного шва. В таблице 3.19 приведены значения предела прочности при растяжении  $\sigma_b$  различных марок сталей, а в таблице 3.20 — типы электродов для сварки углеродистых и низколегированных сталей и значения предела прочности металла шва сварного соединения (ГОСТ 9467-75).

Таблица 3.19

Значения предела прочности при растяжении  $\sigma_b$  различных марок сталей

Марка стали	$\sigma_b$ , МПа	Марка стали	$\sigma_b$ , МПа
Ст2	390	25	460
Ст3	430	30	500
Ст4	489	35	530
Ст5	550	40	550
08	330	09Г2	450
10	340	09Г2С	430...490
15	380	10Г2	420
20	420	16ГС	480

Таблица 3.20

Типы электродов для сварки углеродистых и низколегированных сталей

Тип электрода	Предел прочности при растяжении $\sigma_B$ , МПа	Тип электрода	Предел прочности при растяжении $\sigma_B$ , МПа
Э38	380	Э46А*	460
Э42	420	Э50А*	500
Э42А*	420	Э55	550
Э46	460	Э60	600

Марка электрода выбирается в зависимости от типа электрода и назначения сварного узла или конструкции. В таблице 3.21 для каждого типа электрода приведены соответствующие марки и их основные характеристики: род тока, коэффициент наплавки  $\alpha_n$  и коэффициент расхода электродов  $k_3$ .

Таблица 3.21

Марки электродов для сварки углеродистых и низколегированных сталей

Тип	Марка	Назначение	Род тока*	$\alpha_n$ , г/А·ч	$k_3$
1	2	3	4	5	6
Э38	ОЗС-41	Сварка рядовых конструкций из низкоуглеродистых сталей	Пр, П	8,0	1,8
Э42	АНО-6	Сварка конструкций из углеродистых сталей с содержанием углерода до 0,25 %	Пр, П	8,0...9,5	1,6...1,65
	ВСЦ-4М	Сварка стыков трубопроводов из углеродистых и низколегированных сталей	П	9,0	1,8
	ОЗС-12И/42	Сварка конструкций из низкоуглеродистых сталей	Пр, П <sub>пп</sub>	8,0	1,7
	ОЗС-23	Сварка конструкций из тонколистовых (толщина 1...3 мм) углеродистых сталей	Пр, П <sub>оп</sub>	8,5	1,6

Продолжение таблицы 3.21

1	2	3	4	5	6
Э42А	УОНИ-13/45	Сварка особо ответственных конструкций из углеродистых и низкоуглеродистых сталей, когда к металлу швов предъявляют повышенные требования по пластичности и ударной вязкости	П <sub>оп</sub>	8,5...9,5	1,6
Э46	АНО-4	Сварка конструкций из низкоуглеродистых сталей	Пр, П	8,0...8,5	1,6...1,6 5
	МР-3	Сварка ответственных конструкций из углеродистых сталей	Пр, П	8,0...8,5	1,7
	АНО-36	Сварка рядовых и ответственных конструкций из низкоуглеродистых сталей	Пр, П	8,0...8,5	1,7
	АНО-21	Сварка угловых, стыковых, нахлесточных, соединений рядовых и ответственных металлоконструкций из металла толщиной 1,0...5,0 мм	Пр, П	7,0...8,0	1,65
	ОЗС-3	Высокопроизводительная сварка ответственных конструкций из углеродистых сталей в нижнем положении шва	Пр, П <sub>оп</sub>	15,0	1,3

Продолжение таблицы 3.21

1	2	3	4	5	6
Э46А	УОНИ-13/55К	Сварка особо ответственных жестких конструкций из углеродистых и низколегированных сталей, работающих при знакопеременных нагрузках и пониженных температурах, в частности, в дизелестроении	П <sub>оп</sub>	9,5	1,6
Э50А	УОНИ-13/55	Сварка особо ответственных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей, когда к металлу швов предъявляют повышенные требования по пластичности и ударной вязкости	П <sub>оп</sub>	8,5...9,5	1,6
	ОЗС-18	Сварка ответственных конструкций из низколегированных сталей, стойких к атмосферной коррозии	П <sub>оп</sub>	9,5	1,5
Э55	УОНИ-13/55У	Сварка стержней арматуры железобетонных конструкций и рельсов из углеродистых и низколегированных сталей	Пр, П	10,0	1,6

Окончание таблицы 3.21

1	2	3	4	5	6
Э60	ВСФ-65У	Сварка стыков трубопроводов и других ответственных конструкций из низколегированных сталей	П <sub>оп</sub>	9,5	1,4
	ВИ-10-6	Сварка особо ответственных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей	П <sub>оп</sub>	8,0	1,9
*Примечание: Пр — переменный ток; П — постоянный ток (П <sub>пр</sub> — прямой полярности; П <sub>оп</sub> — обратной полярности).					

### Определение силы сварочного тока и напряжения на дуге.

Силу сварочного тока  $I$  определяем по эмпирической формуле

$$I = k d, \quad (3.6)$$

где  $k$  — коэффициент плотности тока, А/мм (табл. 3.22).

Таблица 3.22

Зависимость плотности тока от диаметра электрода

$d$ , мм	1, 2	3, 4	5, 6
$k$ , А/мм	25...30	30...45	45...60

Напряжение на дуге  $U_d$  определяем по формуле

$$U_d = \alpha + \beta l_d, \quad (3.7)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, характеризующий падение напряжения на аноде или катоде (для стальных электродов принимаем  $\alpha = 10...12$  В);  $l_d$  — длина дуги ( $l_d = 0,5 (d + 2)$ , мм);  $\beta$  — коэффициент, характеризующий падение напряжения на 1 мм длины дуги (принимаем  $\beta = 2...3$  В/мм).

### Выбор оборудования для сварки.

Для рассчитанных режимов ручной дуговой сварки (сила тока  $I$  и напряжение на дуге  $U_d$ ) и выбранных рода и полярности тока определяем источник питания сварочной дуги (табл. 3.23...3.25).

Таблица 3.23

Технические данные трансформаторов с увеличенным магнитным рассеянием для ручной дуговой сварки

Марка Параметры	СТШ-250	ТСМ-250	ТДЭ-101	ТДЭ-251
Номинальный сварочный ток, А	250	250	100	250
Номинальное рабочее напряжение, В	25	25	24	30
Пределы регулирования тока, А	70...250	90...250	40...110	90...260
Напряжение холостого хода, В	62	62	42	55
Коэффициент полезного действия, %	86	69	60	67

Таблица 3.24

Технические данные трансформаторов для ручной дуговой сварки

Марка Параметры	ТДК-2	ТД-306	ТД-300	ТДМ-254
Номинальный сварочный ток, А	160	250	315	250
Номинальное рабочее напряжение, В	26	30	33	33
Пределы регулирования сварочного тока, А	60...175	60...360	60...360	60...370
Напряжение холостого хода, В, не более	80	80	80	80
Коэффициент полезного действия, %	72	86	86	86

Таблица 3.25

Технические характеристики универсальных тиристорных выпрямителей

Марка Параметры	ВДУ-505	ВДУ 506	ВДУ-601	ВДУ-1201
Номинальный сварочный ток, А	500	500	630	1250
Напряжение холостого хода, В – не более	90	85	90	85
Номинальное рабочее напряжение, В: – жесткие характеристики	50	50	56	56
– падающие характеристики	46	46	52	52
Пределы регулирования сварочного тока, А: – жесткие характеристики	60...500	60...500	65...530	300...1250
– падающие характеристики	50...500	50...500	50...630	300...1250
Пределы регулирования рабочего напряжения, В: – жесткие характеристики	18...50	18...56	18...56	24...56
– падающие характеристики	22...46	22...46	22...52	26...56
К.П.Д., % – не менее	82	79	75	83,5

**Определение скорости сварки.**Скорость сварки  $v$  определяем по формуле

$$v = \frac{\alpha_n I}{\gamma F_n}, \quad (3.8)$$

425

где  $\alpha_n$  — коэффициент наплавки, г/А·ч (табл. 3.21).

#### **Определение времени сварки.**

Технологическое время сварки  $\tau_T$  (время горения электрической дуги) определяем по формуле

$$\tau_T = \frac{G_{\text{общ}}}{\alpha_n I}. \quad (3.9)$$

Дополнительное время сварки  $\tau_{\text{доп}}$  (установка и поворот детали, уход за сварочным оборудованием, получение наряда) составляет 30...50 % от технологического и определяется по формуле

$$\tau_{\text{доп}} = (0,3 \dots 0,5) \tau_T. \quad (3.10)$$

Полное время  $\tau$ , затраченное на сварочные работы, рассчитываем по формуле

$$\tau = \tau_T + \tau_{\text{доп}}. \quad (3.11)$$

#### **Определение расхода электродов и электроэнергии.**

Расход электродов  $G_3$  для выполнения сварочных работ определяем по формуле

$$G_3 = k_3 G_{\text{общ}}, \quad (3.12)$$

где  $k_3$  — коэффициент расхода электродов (табл. 3.21).

Расход электроэнергии  $W$  на выполнение сварочных работ определяем по формуле

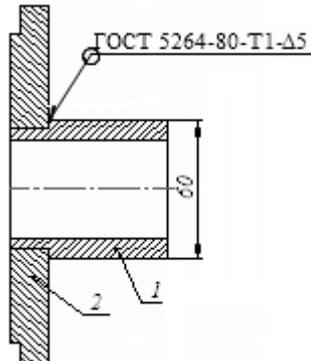
$$W = \frac{U_d I \tau_T}{1000 \eta} + P_{\text{хх}} (\tau - \tau_T), \quad (3.13)$$

где  $\eta$  — К.П.Д. источника питания сварочной дуги (табл. 3.23...3.25);  $P_{\text{хх}}$  — мощность холостого хода источника питания сварочной дуги (при сварке на переменном токе  $P_{\text{хх}} = 0,2 \dots 0,3$  кВт, а на постоянном токе  $P_{\text{хх}} = 2,5 \dots 3,0$  кВт).

**Составление маршрутной карты технологического процесса ручной дуговой сварки сварного узла.**

По рассчитанным и выбранным режимам ручной дуговой сварки студент составляет маршрутную карту технологического процесса ручной дуговой сварки сварного узла.

**Пример выполнения индивидуального задания**



Корпус крана: 1 — втулка; 2 — крышка

Вариант 10

Марка стали — 10

Количество сварных узлов — 4 шт.

**1. Определение типа сварного соединения.**

Условное обозначение сварного соединения на чертеже — ГОСТ 5264-80-T1-Δ5, следовательно тип соединения — тавровое (T1).

**2. Определение площади поперечного сечения и объема сварного шва, массы наплавленного металла шва и общей массы наплавленного металла.**

Площадь поперечного сечения шва  $F_n$  рассчитываем по формуле (3.2), учитывая, что  $K = 5$  мм ( $\Delta 5$  — в условном обозначении сварного соединения на чертеже), а  $K_y = 1,35$  (табл. 3.17):

$$F_n = \frac{K^2}{2} K_y = \frac{5^2}{2} \cdot 1,35 = 16,9 \text{ мм}^2.$$

Объем наплавленного металла сварного шва  $V_n$  рассчитываем по формуле (3.3), учитывая, что длина шва  $l = \pi d$  ( $d = 60$  мм):

$$V_n = F_n l = F_n \pi d = 16,9 \cdot 3,14 \cdot 60 = 3184 \text{ мм}^3 = 3,2 \text{ см}^3.$$

Массу наплавленного металла шва  $G_n$  определяем из выражения (3.4), принимая  $\gamma = 7,86 \text{ г/см}^3$  (плотность стали):

$$G_n = V_n \gamma = 3,2 \cdot 7,86 = 25,2 \text{ г.}$$

Общую массу наплавленного металла  $G_{\text{общ}}$  определяем по формуле (3.5), учитывая, что  $n = 4$ :

$$G_{\text{общ}} = n G_n = 25,2 \cdot 4 = 100,8 \text{ г.}$$

$$F_n = 16,9 \text{ см}^2; V_n = 3,2 \text{ см}^3; G_n = 25,2 \text{ г}; G_{\text{общ}} = 100,8 \text{ г.}$$

### 3. Выбор диаметра электрода.

Диаметр электрода при получении углового шва таврового соединения выбираем в зависимости от величины катета шва  $K$  (табл. 3.18). В данном случае для  $K = 5$ , принимаем  $d = 4 \text{ мм}$ .

$$d = 4 \text{ мм.}$$

### 4. Выбор типа и марки электрода.

Тип электрода выбираем, учитывая равнопрочность материалов сварного соединения и сварочного шва: для стали 10 предел прочности  $\sigma_b = 340 \text{ МПа}$  (табл. 3.19), соответственно из таблицы 3.20 выбираем тип электрода Э38 ( $\sigma_b = 380 \text{ МПа}$ ).

Марка электрода выбирается в зависимости от типа электрода и назначения сварного узла или конструкции (табл. 3.21). Для сварки низкоуглеродистой стали 10 выбираем марку электрода ОЗС-41.

$$\text{Тип электрода — Э38; марка электрода — ОЗС-41.}$$

### 5. Определение силы сварочного тока и напряжения на дуге.

Силу сварочного тока  $I$  определяем по эмпирической формуле (3.6), принимая  $k = 45 \text{ А/мм}$  (табл. 3.22):

$$I = k d = 45 \cdot 4 = 180 \text{ А.}$$

Напряжение на дуге  $U_d$  определяем по формуле (3.7), принимая  $\alpha = 12 \text{ В}$ ,  $\beta = 3 \text{ В/мм}$ :

$$U_d = \alpha + \beta I_d = \alpha + \beta (0,5 (d+2)) = 12 + 3 \cdot (0,5 \cdot (4+2)) = 21 \text{ В.}$$

$$(I_d = 0,5 (d+2) = 0,5 \cdot (4+2) = 3 \text{ мм}).$$

$$I = 180 \text{ А; } U = 21 \text{ В; } I_d = 3 \text{ мм.}$$

#### 6. Выбор оборудования для сварки.

Для рассчитанных режимов ручной дуговой сварки ( $I = 180 \text{ А}$ ,  $U = 21 \text{ В}$ ) при сварке переменным током выбираем из таблицы 3.24 трансформатор ТДК-2.

Трансформатор ТДК-2.

#### 7. Определение скорости сварки.

Скорость сварки определяем по формуле (3.8), принимая  $\alpha_n = 8 \text{ г/А}\cdot\text{ч}$  (табл. 3.21):

$$v = \frac{\alpha_n I}{\gamma F_n} = \frac{8 \cdot 180}{7,86 \cdot 0,17} = 1078 \text{ см/ч} = 10,8 \text{ м/ч.}$$

$$v = 10,8 \text{ м/ч.}$$

#### 8. Определение времени сварки.

Технологическое время сварки определяем по формуле (3.9):

$$\tau_r = \frac{G_{\text{общ}}}{\alpha_n I} = \frac{100,8}{8 \cdot 180} = 0,07 \text{ ч.}$$

Дополнительное время сварки определяем по формуле (3.10):

$$\tau_{\text{доп}} = 0,4 \cdot \tau_r = 0,4 \cdot 0,07 = 0,03 \text{ ч.}$$

Полное время, затраченное на сварочные работы, рассчитываем по формуле (3.11):

$$\tau = \tau_r + \tau_{\text{доп}} = 0,07 + 0,03 = 0,1 \text{ ч.}$$

$$\tau_r = 0,07 \text{ ч; } \tau = 0,1 \text{ ч.}$$

### 9. Определение расхода электродов и электроэнергии.

Расход электродов для выполнения сварочных работ определяем по формуле (3.12), принимая  $k_3 = 1,8$  (табл. 3.21):

$$G_3 = k_3 G_{\text{общ}} = 1,8 \cdot 100,8 = 181,4 \text{ г.}$$

Расход электроэнергии на выполнение сварочных работ определяем по формуле (3.13), принимая  $\eta = 0,72$  (табл. 3.24, трансформатор ТДК-2),  $P_{\text{xx}} = 0,2$  кВт (сварка на переменном токе):

$$W = \frac{U_d I \tau_r}{1000 \eta} + P_{\text{xx}} (\tau - \tau_r) = \frac{21 \cdot 180 \cdot 0,07}{1000 \cdot 0,72} + 0,2(0,1 - 0,07) = 0,37 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

$$G_3 = 181,4 \text{ г; } W = 0,37 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

10. Составление маршрутной карты технологического процесса ручной дуговой сварки сварного узла (рис. 3.98).



## РАЗНОУРОВНЕВЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО МОДУЛЮ 3

Билет для разноуровневого контроля знаний по модулю имеет следующую структуру:

1) уровень I (репродуктивный): компьютерное тестирование (6 тестовых заданий). Правильный ответ оценивается в 0,5 балла.

2) уровень II (продуктивный): 2 вопроса. В зависимости от полноты и качества ответа студента оценка равняется 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 балла за каждый вопрос.

3) уровень III (творческий): 1 задание (вопрос) повышенной трудности. Максимальная оценка — 3 балла.

### Уровень I (репродуктивный)

1. К сварке плавлением относится:

- 1) газовая сварка;
- 2) сварка трением;
- 3) стыковая сварка.

2. К сварке плавлением относится:

- 1) сварка трением;
- 2) лазерная сварка;
- 3) стыковая сварка.

3. Максимальная температура плазменной струи находится в пределах:

- 1) 10 000...20 000 °С;
- 2) 5 000...9 000 °С;
- 3) 1 000...2 000 °С.

4. Содержание углерода в сварочной проволоке марки Св-09Х18Н9 составляет:

- 1) 0,9 %;
- 2) 0,09 %;
- 3) 9 %.

5. К сварке давлением относится:

- 1) газовая сварка;
- 2) стыковая сварка;
- 3) сварка под слоем флюса.

6. К сварке давлением относится:

- 1) диффузионная сварка;
- 2) лазерная сварка;
- 3) сварка в среде защитного газа.

7. Для сварки в среде защитного газа используется:

- 1) углекислый газ;
- 2) природный газ;
- 3) кислород.

8. Функцией защитного газа при электродуговой сварке в среде защитных газов заключается:

- 1) в защите нагретого конца электрода;

- 2) в защите сварочной ванны;
- 3) в защите сварочной дуги.
9. Для сварки в среде защитного газа используется:
- 1) аргон;
  - 2) природный газ;
  - 3) кислород.
10. При электрошлаковой сварке тепло выделяется:
- 1) в шлаковой ванне;
  - 2) в основном металле;
  - 3) в твердом флюсе.
11. Электрошлаковая сварка используется для сварки:
- 1) толстых листов;
  - 2) тонких листов;
  - 3) нахлесточных соединений.
12. Критерием, по которому выбирается диаметр электрода при сварке швов стыковых соединений, является:
- 1) толщина листов;
  - 2) сила тока;
  - 3) катет шва.
13. Для лазерной обработки и сварки применяют лазеры:
- 1) стеклянные;
  - 2) кристаллическо-рубиновые;
  - 3) полупроводниковые.
14. Буква А в обозначении типа электрода Э42А обозначает:
- 1) повышенную пластичность и ударную вязкость сварного шва;
  - 2) повышенное качество сварочной проволоки;
  - 3) гарантию химического состава.
- 3) повышенное качество сварочной проволоки.
15. При сварке трением
- 1) детали вращаются относительно друг друга в разных направлениях;
  - 2) обе детали неподвижны;
  - 3) детали вращаются относительно друг друга в одном направлении.
16. Сварка электрической дугой прямой полярности осуществляется, когда:
- 1) минус — электрод, плюс — изделие;
  - 2) минус — изделие, плюс — электрод;
  - 3) применяется переменный ток.
17. Сварка электрической дугой обратной полярности осуществляется, когда:
- 1) минус — изделие, плюс — электрод;
  - 2) минус — электрод, плюс — изделие;
  - 3) применяется переменный ток.
18. Буква А в обозначении сварочной проволоки Св-08А обозначает:
- 1) повышенную пластичность и ударную вязкость сварного шва;
  - 2) повышенное качество сварочной проволоки;
  - 3) гарантию химического состава.

19. Температура дуги ручной дуговой сварки составляет:
- 1) 2 000...4 000 °С;
  - 2) 6 000...8 000 °С;
  - 3) 10 000...20 000 °С.
20. Критерием, по которому выбирается диаметр электрода при сварке швов угловых и тавровых соединений, является:
- 1) катет шва;
  - 2) толщина листов;
  - 3) сила тока.
21. Критерием, по которому выбирается сила сварочного тока при ручной дуговой сварке, является:
- 1) длина дуги;
  - 2) диаметр электрода;
  - 3) напряжение на дуге.
22. Источником питания сварочной дуги переменного тока является:
- 1) трансформатор;
  - 2) преобразователь;
  - 3) выпрямитель.
23. Источником питания сварочной дуги с наибольшим К.П.Д. является:
- 1) трансформатор;
  - 2) выпрямитель;
  - 3) преобразователь.
24. Источником питания сварочной дуги с наименьшим К.П.Д. является:
- 1) трансформатор;
  - 2) преобразователь;
  - 3) выпрямитель.
25. Критерием, по которому отличаются друг от друга сварочные проволоки марок Св-08, Св-08А, является:
- 1) содержание углерода;
  - 2) содержание вредных примесей S и P;
  - 3) содержание легирующих элементов.
26. Цифры в марке сварочной проволоки Св-12 обозначают:
- 1) содержание углерода в проволоке;
  - 2) содержание углерода в шве;
  - 3) диаметр проволоки.
27. Число 13 в марке сварочной проволоки Св-12Х13 обозначает:
- 1) содержание углерода;
  - 2) содержание хрома;
  - 3) диаметр проволоки.
28. Параметром, по которому определяется тип электрода, является:
- 1) предел прочности стали;
  - 2) содержание углерода в стали;
  - 3) толщина свариваемого металла.
29. Сталями, для сварки которых в качестве защитного газа используется углекислый газ, являются:
- 1) высокоуглеродистые;
  - 2) малоуглеродистые и низко-легированные;
  - 3) высоколегированные.

30. Типом электрода для сварки стали, имеющей предел прочности равный 460 МПа и испытывающей при работе ударные и знакопеременные нагрузки, является:
- 1) Э-46А;
  - 2) Э-46;
  - 3) Э-50.
31. Сварным соединением, применяемым при сварке резервуаров, фланцев, трубопроводов, является:
- 1) угловое;
  - 2) стыковое;
  - 3) тавровое.
32. Сварным соединением, применяемым при сварке балок, колонн, стоек, является:
- 1) тавровое;
  - 2) угловое;
  - 3) стыковое.
33. Признаком классификации электродов на типы является:
- 1) назначение и механические свойства металла шва;
  - 2) состав покрытия;
  - 3) род тока.
34. Толщина каждой из заготовок при точечной контактной сварке составляет:
- 1) до 35 мм;
  - 2) не более 2...3 мм;
  - 3) любая.
35. Способом нагрева металла при контактной сварке является:
- 1) горение ацетилена в струе кислорода;
  - 2) прохождение электрического тока через место контакта;
  - 3) горение электрической дуги.
36. Способом контактной сварки, обеспечивающим получение непрерывного герметичного шва, является:
- 1) стыковая;
  - 2) шовная;
  - 3) точечная.
37. Толщина каждой из заготовок при шовной сварке составляет:
- 1) до 35 мм;
  - 2) любая;
  - 3) не более 2...3 мм.
38. Газом с наибольшей температурой при сгорании в среде кислорода является:
- 1) ацетилен;
  - 2) природный газ;
  - 3) водород.
39. Горючим газом, находящим наибольшее применение при газовой сварке, является:
- 1) ацетилен;
  - 2) кислород;
  - 3) пропан.
40. Температура пламени при сгорании ацетилена в среде кислорода составляет:
- 1) 2 000...3 000 °С;
  - 2) более 3 000 °С;
  - 3) менее 2 000 °С.

41. Давление кислорода в баллоне составляет:

- 1) 15 МПа;
- 2) 0,18 МПа;
- 3) 1,5 МПа.

42. Приспособлением для смешивания в требуемой пропорции кислорода и ацетилена является:

- 1) редуктор;
- 2) горелка;
- 3) вентиль.

43. Материалами, для сварки которых газовая сварка не рекомендуется, являются:

- 1) толстолистовая сталь;
- 2) медные и алюминиевые сплавы;
- 3) тонколистовая сталь.

44. Приспособлением для понижения давления газа, поступающего из баллона является:

- 1) вентиль;
- 2) редуктор;
- 3) манометр.

45. Метод сварки неплавящимся электродом по фамилии ученого назван

- 1) методом Патона;
- 2) методом Бенардоса;
- 3) методом Славянова.

46. Метод сварки плавящимся электродом по фамилии ученого назван

- 1) методом Патона;
- 2) методом Бенардоса;
- 3) методом Славянова.

### Уровень II (продуктивный)

1. Определение сварного шва. Виды сварных соединений. Классификация сварных швов по положению в пространстве.

2. Механизмы установления межатомных связей при сварке плавлением и сварке давлением. Способы сварки плавлением и сварки давлением.

3. Источники питания сварочного тока, принцип их работы, преимущества и недостатки. Сварка дугой прямой и обратной полярности.

4. Сущность процесса дуговой сварки. Определение электрической дуги. Ее свойства. Сущность сварки по методу Бенардоса и по методу Славянова. Назначение покрытия на электродах, используемых при ручной дуговой сварке.

5. Газовая сварка и кислородная резка металлов. Сущность, оборудование и особенности.

6. Электрошлаковая сварка. Сущность, оборудование и приспособления.

7. Дуговая сварка под флюсом, в среде аргона и углекислого газа. Сущность, оборудование и особенности. Назначение флюсов при дуговой сварке под флюсом.

8. Контактная сварка: точечная, шовная и стыковая. Сущность, оборудование и особенности.

9. Электронно-лучевая и лазерная сварка. Сущность, оборудование и приспособления.

10. Плазменная сварка. Сущность, оборудование и приспособления.

11. Сварка взрывом. Сущность, оборудование и приспособления.

12. Диффузионная сварка. Сущность, оборудование и приспособления.

13. Ультразвуковая сварка. Сущность, оборудование и приспособления.

14. Сварка трением. Сущность, оборудование и приспособления.

15. Холодная сварка. Сущность, оборудование и приспособления.

16. Пайка металлов и сплавов. Оборудование и материалы для пайки.

17. Наплавка и напыление металлов. Основные способы, оборудование и материалы.

### Уровень III (творческий)

1. Сравнить прочность паяного соединения и соединения, полученного точечной сваркой, если диаметр электродов при точечной сварке  $d = 5$  мм. Схема сборки деталей для сварки и пайки представлена на рисунке 3.99.

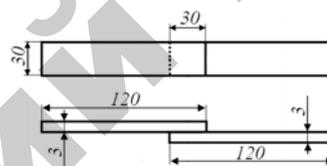


Рис. 3.99. Схема сборки деталей для пайки и точечной сварки

2. Определить массу наплавленного металла шва  $G_n$  сварного соединения (рис. 3.100), полученного ручной дуговой сваркой стальным электродом. Коэффициент усиления шва  $K_y$  принять равным 1,5.

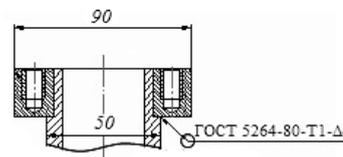


Рис. 3.100. Сварное соединение, полученное ручной дуговой сваркой

3. Описать методику выбора типа и марки электрода при ручной дуговой сварке.

4. Оценить качество сварного соединения, полученного точечной сваркой, если разрушающая нагрузка при срезе сварной точки  $F = 5\,400$  Н, диаметр электродов сварочной машины  $d = 6$  мм, материал свариваемых изделий — сталь 20 (предел текучести  $\sigma_T = 245$  МПа).

5. Выбрать диаметр электрода  $d$ , силу сварочного тока  $I$  и напряжение на дуге  $U_d$  для получения стыкового сварного соединения ручной дуговой сваркой. Толщина свариваемых изделий  $S = 8$  мм, коэффициент плотности тока  $k = 45$  А/мм, коэффициент, характеризующий падение напряжения,  $\alpha = 10$  В, коэффициент, характеризующий падение напряжения на 1 мм длины дуги,  $\beta = 3$  В/мм.

6. Описать методику выбора оборудования для ручной дуговой сварки.

7. Определить скорость ручной дуговой сварки  $v$  стальным электродом для получения углового соединения (катет шва  $K = 4$  мм, коэффициент усиления шва  $K_y = 1,5$ ). Коэффициент наплавки  $\alpha_n = 8,0$  г/А·ч, сила сварочного тока  $I = 120$  А.

8. Определить технологическое  $\tau_T$  и полное  $\tau$  время ручной дуговой сварки стальным электродом при получении углового соединения (площадь поперечного сечения сварного шва  $F_n = 6,8$  мм<sup>2</sup>, длина шва  $l = 190$  мм). Коэффициент наплавки  $\alpha_n = 8,5$  г/А·ч, сила сварочного тока  $I = 90$  А.

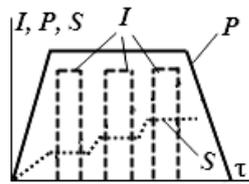


Рис. 3.101. Циклограмма контактной сварки

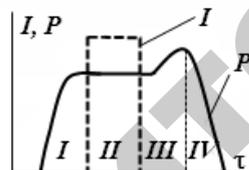


Рис. 3.102. Циклограмма контактной сварки

9. Определить расход электроэнергии  $W$  на выполнение сварочных работ, если масса наплавленного металла швов  $G_{\text{общ}} = 120$  г, коэффициент наплавки  $\alpha_n = 8,5$  г/А·ч, сила сварочного тока  $I = 90$  А, напряжение на дуге  $U_d = 25$  В, К.П.Д. трансформатора ТДЭ-251  $\eta = 67\%$ , а мощность его холостого хода  $P_{\text{хх}} = 0,3$  кВт.

10. По циклограмме (рис. 3.101) определить вид контактной сварки, описать ее процесс и режимы.

11. По циклограмме (рис. 3.102) определить вид контактной сварки, описать ее процесс и режимы.

12. Определить к какой группе по свариваемости относится сталь 20ХГСА (рассчитать эквивалентное содержание углерода  $C_3$ ). Привести характеристику этой группы сталей по свариваемости: склонность к образованию трещин и необходимость термообработки (до сварки, в ее процессе и после сварки).

13. Определить, к какой группе по свариваемости относится сталь 8Х3 (рассчитать эквивалентное содержание углерода  $C_3$ ). Привести характеристику этой группы сталей по свариваемости: склонность к образованию трещин и необходимость термообработки (до сварки, в ее процессе и после сварки).

14. Определить, к какой группе по свариваемости относится сталь 15ХМ (рассчитать эквивалентное содержание углерода  $C_3$ ). Привести характеристику этой группы сталей по свариваемости: склонность к образованию трещин и необходимость термообработки (до сварки, в ее процессе и после сварки).

15. Определить, какими видами сварки выполнены соединения, представленные на рисунке 3.103. Обосновать свой выбор.

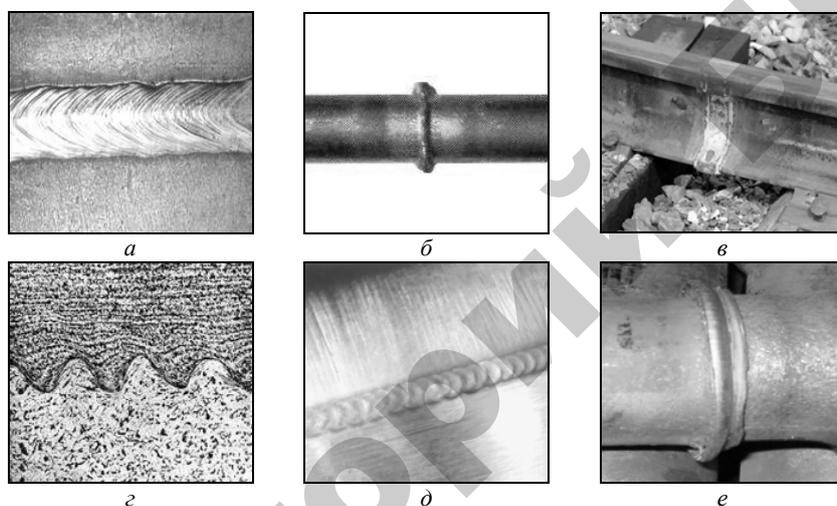


Рис. 3.103. Соединения, полученные различными видами сварки

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Калиновский, В. Р.* Технологии горячей обработки металлов : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений по техн. специальностям / В. Р. Калиновский, В. М. Капцевич, А. Ф. Ильющенко. – Минск : ИВЦ Минфина, 2008. – 352 с.
2. *Калиновский, В. Р.* Технологии горячей обработки металлов : учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений по техн. специальностям / В. Р. Калиновский, В. М. Капцевич, А. Ф. Ильющенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : ИВЦ Минфина, 2010. – 352 с.
3. *Калиновский, В. Р.* Литье. Обработка давлением. Сварка : учеб. пособие для студ. технич. спец. с.-х. вузов / В. Р. Калиновский, В. М. Капцевич, А. Ф. Ильющенко. – Минск : БГАТУ, 2004. – 298 с.
4. Технология конструкционных материалов: учебник для студ. техн. спец. вузов / О. С. Комаров [и др.]; под общ. ред. О. С. Комарова. – Минск : Новое знание, 2005. – 560 с.
5. Технология конструкционных материалов : учебник для машиностроит. вузов / А. М. Дальский [и др.]; под общ. ред. А. М. Дальского. – 6-е изд., испр. и доп. – Москва : Машиностроение, 2005. – 592 с.
6. Материаловедение и технология металлов : учебник для студ. машиностроит. спец. вузов / Г. П. Фетисов [и др.]; под ред. Г. П. Фетисова – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Высш. шк., 2005. – 862 с.
7. Технология конструкционных материалов : учебник для машиностроит. спец. вузов / А. М. Дальский [и др.]; под общ. ред. А. М. Дальского – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1985. – 448 с.
8. *Пейсахов, А. М.* Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебник для студ. немашиностроит. спец. / А. М. Пейсахов, А. М. Кучер. – Санкт-Петербург : Изд-во Михайлова В.А., 2003. – 406 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

РЕПОЗИТОРИЙ БГАТУ

ДЛЯ ЗАМЕТОК

РЕПОЗИТОРИЙ БГАТУ

ДЛЯ ЗАМЕТОК

РЕПОЗИТОРИЙ БГАТУ

Учебное издание

**Капцевич Вячеслав Михайлович,  
Корнеева Валерия Константиновна,  
Калиновский Виктор Рувимович**

## ГОРЯЧАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

*Учебно-методический комплекс*

Ответственный за выпуск *В. М. Капцевич*  
Редактор *Н. Н. Акимов, Н. А. Антипович*  
Компьютерная верстка *В. К. Корнеевой*

Подписано в печать 01.11.2012 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 25,8. Уч.-изд. л. 20,18. Тираж 150 экз. Заказ 991.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
ЛИ № 02330/0552984 от 14.04.2010.  
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.  
Пр. Независимости, 99–2, 220023, Минск.