

**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Материаловедение в машиностроении»**

**И. Н. Степанкин**

**ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ  
ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

**ПОСОБИЕ**

**по одноименной дисциплине для студентов  
специальности 1-36 07 02 «Производство изделий  
на основе трехмерных технологий»  
дневной формы обучения**

**Гомель 2021**

УДК 621.7(075.8)  
ББК 30.6я73  
С79

*Рекомендовано научно-методическим советом  
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 5 от 06.05.2020 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Металлургия и технологии обработки материалов»  
ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц. *Ю. Л. Бобарикин*

**Степанкин, И. Н.**  
С79 Технология формообразования изделий из конструкционных материалов : пособие по одному. дисциплине для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» днев. формы обучения / И. Н. Степанкин. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 293 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Освещены вопросы изготовления трехмерных деталей на современных машиностроительных предприятиях, а также технологические аспекты, связанные с основными положениями теории литейного производства и обработки материалов давлением, сварочным производством металлических и неметаллических конструкционных материалов, их обработкой резанием, методами получения изделий из полимерных материалов и других неметаллических материалов.

Для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» дневной формы обучения.

УДК 621.7(075.8)  
ББК 30.6я73

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие .....</b>	<b>6</b>
<b>Глава 1. Основы металлургического производства .....</b>	<b>7</b>
1.1. Структура металлургического производства .....	7
1.2. Сырье и вспомогательные материалы .....	7
1.3. Металлургические процессы .....	8
1.4. Производство чугуна .....	9
1.5. Металлургия стали .....	14
1.6. Производство цветных металлов .....	30
1.6.1. Производство меди .....	30
1.6.2. Производство алюминия .....	31
1.6.3. Получение магния .....	33
1.6.4. Производство титана .....	33
<b>Глава 2. Геометрические параметры поверхностных слоев деталей машин .....</b>	<b>35</b>
<b>Глава 3. Технология литейного производства .....</b>	<b>40</b>
3.1. Общая характеристика литейного производства .....	40
3.2. Литейные свойства сплавов .....	42
3.3. Изготовление отливок в песчаных формах .....	46
3.4. Специальные способы литья .....	57
3.4.1. Литье в оболочковые формы .....	57
3.4.2. Литье по выплавляемым моделям .....	59
3.4.3. Литье в кокиль .....	62
3.4.4. Литье под давлением .....	63
3.4.5. Литье под низким давлением .....	65
3.4.6. Литье вакуумным всасыванием .....	66
3.4.7. Литье намораживанием .....	67
3.4.8. Литье методом жидкой прокатки .....	67
3.4.9. Центробежное литье .....	68
3.4.10. Непрерывное литье .....	69
3.5. Изготовление отливок из различных сплавов .....	70
3.5.1. Изготовление отливок из чугунов .....	70
3.5.2. Изготовление стальных отливок .....	74
3.5.3. Изготовление отливок из алюминия .....	75
3.5.4. Изготовление отливок из медных сплавов .....	76
3.5.5. Изготовление отливок из магниевых сплавов .....	77
3.5.6. Охрана труда и окружающей среды в литейном производстве .....	81

<b>Глава 4. Обработка металлов давлением.....</b>	<b>83</b>
4.1. Общая характеристика обработки металлов давлением .....	83
4.2. Влияние температуры на пластичность металлов .....	90
4.3. Основные типы оборудования для обработки давлением .....	94
4.4. Классификация процессов обработки металлов давлением .....	96
4.5. Прокатка .....	97
4.6. Волочение .....	108
4.7. Прессование .....	111
4.8. Ковка.....	112
4.9. Штамповка .....	116
4.10. Ротационное деформирование .....	130
<b>Глава 5. Технология сварочного производства .....</b>	<b>133</b>
5.1. Общая характеристика сварочного производства .....	133
5.2. Физические основы получения сварных соединений .....	134
5.3. Сварка плавлением.....	136
5.3.1. Дуговая сварка.....	136
5.3.1.1. Ручная дуговая сварка (РДС) .....	146
5.3.1.2. Автоматическая дуговая сварка под флюсом .....	149
5.3.1.3. Дуговая сварка в защитных газах .....	151
5.3.2. Электрошлаковая сварка .....	153
5.3.3. Плазменная сварка .....	154
5.3.4. Лучевые способы сварки .....	156
5.3.5. Газовая сварка.....	157
5.3.6. Термическая резка металлов .....	160
5.4. Термомеханическая и механическая сварка.....	161
5.4.1. Контактная сварка .....	161
5.4.2. Конденсаторная сварка .....	168
5.4.3. Специальные виды сварки .....	169
5.5. Особенности сварки различных материалов.....	172
5.6. Нанесение износостойких и жаростойких покрытий.....	178
5.6.1. Наплавка. Наплавочные материалы .....	178
5.6.2. Напыление.....	180
5.7. Пайка металлов и сплавов .....	182
5.8. Сварка полимерных материалов.....	186
5.9. Дефекты сварных соединений и контроль сварных швов.....	197
<b>Глава 6. Технологические методы обработки заготовок деталей машин .....</b>	<b>200</b>
6.1. Общая характеристика механической обработки заготовок .....	200
6.2. Физико–механические основы обработки металлов резанием .....	200
6.2.1. Классификация движений в металлорежущих станках. Виды обработки резанием .....	200



6.3. Инструментальные материалы .....	211
6.4. Металлорежущие станки .....	214
6.5. Обработка заготовок на станках токарной группы .....	218
6.6. Обработка заготовок на станках сверлильно-расточной группы .....	228
6.7. Обработка заготовок на фрезерных станках .....	235
6.8. Обработка заготовок на протяжных станках .....	240
6.9. Обработка заготовок на зубообрабатывающих станках .....	243
6.10. Обработка заготовок на шлифовальных станках .....	245
6.11. Методы отделочной обработки поверхностей .....	252
6.12. Электрофизические и электрохимические методы обработки .....	258
6.12.1. Общая характеристика процессов .....	258
6.12.2. Электрохимические методы обработки .....	262
6.12.3. Ультразвуковая обработка .....	264
6.12.4. Электронно-лучевая обработка .....	265
<b>Глава 7. Изготовление деталей из пластмасс .....</b>	<b>270</b>
7.1. Общие сведения о пластмассах .....	270
7.2. Технологические методы изготовления изделий из пластмасс .....	273
7.2.1. Прямое прессование .....	273
7.2.2. Литьеовое прессование .....	273
7.2.3. Литье под давлением .....	276
7.2.4. Центробежное литье .....	278
7.2.5. Экструзия .....	279
7.2.6. Формование изделий из листовых материалов .....	282
7.2.7. Изготовление изделий из композиций холодного отверждения .....	284
7.2.8. Особенности конструктивного оформления деталей из пластмасс .....	286
7.3. Изготовление изделий из резин .....	288
<b>Литература .....</b>	<b>293</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью данного пособия является изложение в сжатой форме основных разделов курса «Технология формообразования изделий из конструкционных материалов», чтобы дать общие представления о процессах изготовления трехмерных заготовок и переработки их в детали машин в машиностроительном производстве. Материал изложен во взаимосвязи методов получения трехмерных заготовок и их последующей механической обработки на металлорежущем оборудовании.

В первой главе даны общие понятия о металлургии металлов. Особое внимание уделено получению чугунов и сталей, так как в машиностроении их доля составляет более 90% от всей массы потребляемых материалов. Во второй, третьей и четвертой главах рассмотрены основные виды заготовительного производства: изготовление заготовок литьем, давлением и сваркой. Даны базовые понятия этих технологических процессов, их возможности, особенности и целесообразные области использования. Шестая глава посвящена вопросам механической обработки заготовок на металлорежущем оборудовании. Рассмотрены принципы классификации станочного оборудования, особенности технологических процессов обработки заготовок на станках различных групп, используемые инструменты и приспособления и их технологические возможности. Приведена краткая информация об электрофизических и электрохимических методах обработки. Седьмая глава посвящена технологическим вопросам изготовления пластмассовых и резинотехнических изделий.

Текст содержит большое количество иллюстраций, способствующих лучшему усвоению материала, не перегружен справочными материалами и конкретными технологическими материалами. При необходимости эту информацию можно найти в справочной литературе и в ученых материалах по соответствующим технологическим процессам. В данном учебном издании не рассматриваются базовые вопросы из области материаловедения и структурообразования, так как они изложены в одноименном курсе лекций, изданном преподавателями С.Н.Бобрышева и Н.В.Грудина.

Предлагаемый курс лекций написан в соответствии с учебной программой курса «Технология формообразования изделий из конструкционных материалов» с учетом нормативных документов Министерства образования Республики Беларусь, регламентирующих объемы учебных изданий.

# Глава 1. ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

## 1.1. Структура металлургического производства

*Металлургическое производство* представляет собой сложную систему различных производств: шахты и карьеры по добыче руд и каменных углей, горно-обогатительные комбинаты, коксо-химические заводы, энергетические цеха, доменные цеха, заводы для получения ферросплавов, сталеплавильные производства, прокатные цеха.

В зависимости от производимой продукции металлургию подразделяют на *черную* и *цветную*. Основная продукция *черной металлургии* - чугуны в виде литейных и перепельных, ферросплавы, стальные слитки для производства сортового проката и стальные слитки для изготовления крупногабаритных валов, роторов турбин и т.д. *Продукция цветной металлургии* - слитки для изготовления сортового проката (уголок, полоса, прутки и др.), слитки для цветного литья, лигатуры (сплавы) для получения легированных сталей, слитки особо чистых металлов для приборостроения и электронной техники.

## 1.2. Сырье и вспомогательные материалы

Для производства продукции металлургии используют руду, флюсы, топливо и огнеупорные материалы.

*Руда* - горная порода, из которой целесообразно извлекать металлы и их соединения. Руда состоит из *минералов*, содержащих металл или его соединения, и *пустой породы*. В зависимости от содержания добываемого металла руды подразделяют на богатые и бедные. *Бедные руды* (с малым содержанием добываемого металла) подвергаются обогащению путем удаления части пустой породы. В металлургии используют железные руды, содержащие не менее 30 % железа, медные – не менее 3 % меди, молибденовые, содержащие не менее 0,005 % молибдена.

*Флюсы* – материалы, вводимые в плавильную печь, образующие легкоплавкие соединения с пустой породой руды или концентратом и золой топлива, называемыми шлаками. *Шлаки* подразделяют на *кислые*, содержащие преимущественно кислотные оксиды типа  $SiO_2$ ,  $P_2O_5$ , и *основные*, содержащие оксиды типа  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $FeO$  и др. Флю-

сы подбирают в соответствии с химическим составом пустой породы. Для песчано-глинистых пород применяют в качестве флюсов известняк или доломитизированный известняк  $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ . Для известковых пустых пород используют кремнезем, кварц или песчаник  $SiO_2$ .

**Топливо.** В качестве топлива используют твердые, жидкие, газообразные углеводородсодержащие продукты – кокс, природный и доменный газы, мазут. Кокс – пористый продукт, получаемый спеканием коксующихся углей при температуре около 1000 °С без доступа кислорода. Содержание углерода в нем доходит до 88 %. В доменном производстве используют кокс в виде кусков размером от 25 до 100 мм.

**Огнеупорные материалы** применяют для внутренней футеровки металлургических печей и ковшей для расплавленного металла. Эти материалы должны выдерживать резкие перепады температур, нагрузки при высоких температурах, быть химически стойкими к воздействию шлаков и печных газов. По химическим свойствам они подразделяются на кислые, основные и нейтральные. *Кислые* содержат большое количество  $SiO_2$  (динасовые, кварцеглинистые), огнеупорность их составляет до 1700°С. *Основные*, содержащие оксиды  $CaO$ ,  $MgO$  (магнезитовый кирпич) имеют огнеупорность до 2000°С. *Нейтральные*, содержащие оксиды  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$  (шамот, углеродистые огнеупоры), обладают огнеупорностью до 2000 °С.

### 1.3. Металлургические процессы

Схематически их можно разбить на два этапа: 1 – *отделение минерала*, содержащего металл, от пустой породы; 2 – *извлечение металла из рудных минералов* за счет химического воздействия на минералы. Эти процессы могут осуществляться способом пирометаллургии, гидрометаллургии, электрометаллургии или химико-металлургическим способом.

**Пирометаллургический** способ основан на подведении тепла, необходимого для протекания химических реакций в жидком расплаве, путем сжигания топлива (получение чугуна, стали, цинка, магния, олова и др.).

**Гидрометаллургический** – основан на получении металлов из водных растворов путем выщелачивания ( $Cu$ ,  $Zn$ ) или осаждения ( $Al$ ,  $W$ ).

**Электрометаллургический** – основан на получении металлов и сплавов в электропечах и при электролизе металлов (*Al, Cu, Mg*) из растворов солей.

**Химико – металлургический** способ представляет собой соединение химических и металлургических процессов, например, получение титана. Из руды получают  $TiCl_4$ , восстанавливают его в губчатую массу и расплавляют эту массу электронагревом.

#### 1.4. Производство чугуна

**Чугунами** называются сплавы железа с углеродом, содержащие углерода более 2,14 %. Выплавка чугуна производится в доменных печах. Сырьем для получения чугуна служат железные руды (магнитный, красный, бурый или шпатовый железняки). **Магнитный железняк (магнетит)** содержит 45...70 % железа в виде ( $FeO \cdot Fe_2O_3$ ) и обладает магнитными свойствами. **Красный железняк (гематит)** содержит 50...60 % железа в виде оксида  $Fe_2O_3$ . Легко обогащается после измельчения методом магнитной сепарации. Содержит мало серы и фосфора, гораздо легче восстанавливается и относится к лучшим железным рудам для получения чугуна. **Бурый железняк** представляет собой водный оксид железа  $Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$  с содержанием железа до 50 % и повышенным загрязнением серой и фосфором. **Шпатовый железняк (сидерит)** содержит 30...40 % железа в виде карбоната  $FeCO_3$ , малое количество серы и фосфора. Руда отличается хорошей восстанавливаемостью.

В качестве *флюсов* используют в основном *известняк* ( $CaCO_3$ ) или доломитизированный *известняк* ( $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ ), т.к. в большинстве случаев пустая порода имеет песчано-глинистый характер (содержит  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$ ).

В качестве *топлива* применяют кокс и добавки природного газа, мазута, пылевидного топлива.

##### **Подготовка руды к плавке**

Для повышения производительности доменной печи, снижения расхода кокса и улучшения качества чугуна производится специальная подготовка руды, которая включает в себя: дробление, сортировку, обогащение и окусковывание руды.

**Дробление** производят для измельчения руды до кусков размером 40...100 мм. Более мелкие фракции идут на окусковывание или агломерацию. Около 80 % руд подвергаются *обогащению*, включаю-

щему промывку руды, гравитацию и магнитную сепарацию. Это дает возможность отделить железосодержащие минералы от пустой породы.

*Агломерация* представляет собой процесс спекания концентрата, известняка, рудной мелочи и пыли в пористые куски при температуре 1300...1500 °С. При этом удаляется сера (85...95 %) и мышьяк, происходит офлюсовывание материала. Агломерат, руда, флюс и кокс, загружаемые в печь в определенном соотношении, называются *шихтой*.

Шихта из измельченных концентратов, флюса и топлива увлажняется и при обработке в грануляторах подвергается *окатыванию*, в результате чего приобретает форму шариков, называемых окатышами, диаметром до 30 мм. Обжиг окатышей производится при температуре 1250...1350 °С.

### **Выплавка чугуна**

Выплавка чугуна производится в печах шахтного типа – доменных печах. Сущность процесса получения чугуна в доменных печах заключается в восстановлении оксидов железа, входящих в состав руды, оксидом углерода, выделяющимся при сгорании топлива в печи, и твердым углеродом.

*Доменная печь* (рис. 1.1) имеет стальной кожух, выложенный внутри шамотным кирпичем 5. Рабочее пространство печи включает колошник 3, шахту 4, распар 6, заплечики 7, горн 8, лещадь 10. Высота доменной печи достигает до 35 м, с полезным объемом до 5000 м<sup>3</sup>. В верхней части колошника находится засыпной аппарат 2, через который производится загрузка шихты 1. При работе печи шихтовые материалы, проплавляясь, опускаются вниз, а в загрузочное устройство печи подаются новые порции шихты. Периодически (через 2...3 часа) из печи через чугунную 11 и шлаковую 9 летки выпускаются образовавшиеся чугун и шлаки. Доменная печь – это агрегат непрерывного действия до капитального ремонта в течение 5...10 лет.

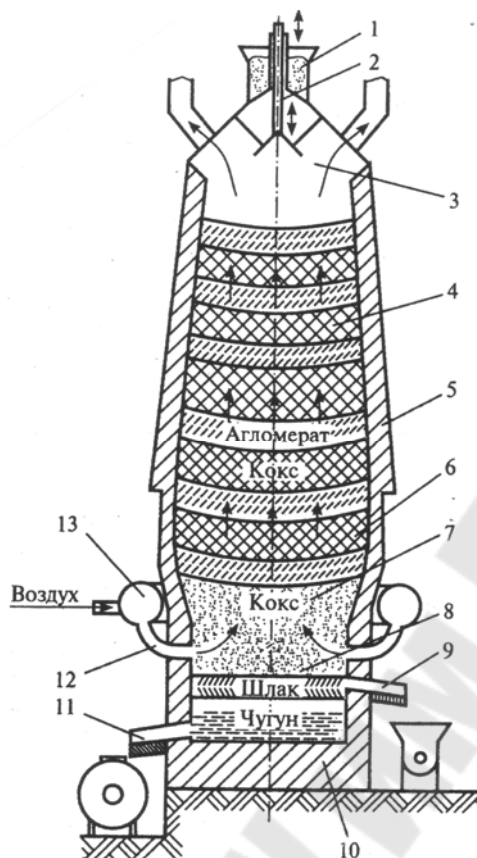
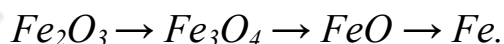


Рис. 1.1. Схема доменной печи

### Доменный процесс

Через водоохлаждаемые фурменные устройства 12, расположенные в верхней части горна, из фурменного пояса 13 под давлением 300 кПа в печь поступает нагретый до температуры 1200 – 1300 °С воздух, необходимый для горения топлива. Доменные печи работают по принципу противотока: поток шихты постепенно, послойно перемещается вниз, а поток горячих газов от фурм вверх. Происходит постоянное непрерывное взаимодействие шихтовых материалов со встречным потоком восстановительных газов. Восстановление железа идет ступенчато – от высшего оксида к низшему

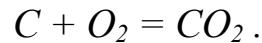


Восстановителями являются оксид углерода, водород, воздух и твердый углерод кокса. Восстановление газами – косвенное, а углеродом – прямое.

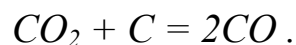
Физико-химические процессы, протекающие в различных зонах доменной печи, определяются существующими там температурными условиями. В колошниковой (загрузочной) зоне температура достигает 200...300 °С. По мере опускания материалов в шахте температура

возрастает и достигает максимума 1900...2100 °С на уровне фурм, а в горне понижается до 1450 °С.

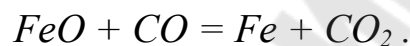
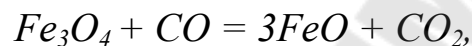
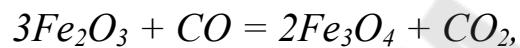
Сгорание топлива происходит в районе фурм, куда подается нагретый воздух или его смесь с кислородом или природным газом



Выделяющаяся при реакции теплота повышает температуру до 1800...2000 °С. Поднимаясь выше, углекислый газ взаимодействует с новыми слоями раскаленного кокса



Образовавшийся оксид углерода восстанавливает железо из оксидов:

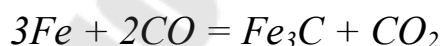


Восстановление железа углеродом начинается уже в верхней части шахты при температуре 400...600 °С. В нижней части шахты косвенное восстановление заканчивается.

Прямое восстановление осуществляется при температурах 950...1400 °С в области распара печи:



Соотношение между прямым и косвенным восстановлением зависит от условий доменного процесса: температуры воздушного дутья, количества природного газа и др. Обычно косвенным путем восстанавливается 60...70 % железа. Потери железа со шлаком составляют около 0,2...1 %. Восстановленное железо находится в виде губчатой массы с температурой плавления 1539 °С. Однако наряду с восстановлением железа происходит и его науглероживание по реакции:



В результате чего образуется сплав железа с углеродом. Кроме образования карбидов железа, углерод образует твердый раствор в высокотемпературной модификации железа  $\gamma$ -Fe, образуя аустенит. Температура плавления сплава ниже чем железа и при содержании около 2 % углерода составляет 1150...1200 °С. Примерно в зоне распара начинается плавление сплава. Капли сплава, стекая в горн и кон-



тактируя с раскаленным коксом, еще более науглероживаются. В горне в сплаве растворяются также восстановленные марганец, кремний и другие сопутствующие элементы, образуя железоуглеродистый сплав - **чугун** с содержанием углерода 3,7...4,0 %. Чугун содержит полезные примеси марганец, кремний и вредные элементы серу и фосфор. В чугунах могут содержаться также иные сопутствующие в руде элементы, например, никель, хром, ванадий и др.

Фосфор, попавший с сырьем в доменную печь, восстанавливается и весь переходит в чугун. Основным источником серы является кокс. Около половины серы удаляется колошниковыми газами в верхних горизонтах печи. Дальнейшее удаление серы, присутствующей в виде  $FeS$ , производится за счет взаимодействия с  $CaO$  и перехода образующегося сульфида кальция  $CaS$  в шлак. Образование шлака начинается в области распара при температуре около  $1200^{\circ}C$  путем сплавления пустой породы с известью. Образующийся шлак стекает в горн, где располагается над слоем чугуна. Периодически шлак выпускается через шлаковую летку, а чугун – через чугунную летку.

В зависимости от размера доменной печи выпуск чугуна производят 10...18 раз в сутки в ковши – чугуновозы емкостью 80...100 т. Жидкий чугун отправляют в сталеплавильные цеха, транспортируя его в отопляемых газом миксерах емкостью до 2000 т, либо получают из расплава небольшие слитки (чушки массой до 55 кг), используемые для последующей переплавки в сталь или в производстве чугунного литья.

### **Продукты доменной плавки**

*Основными продуктами доменной плавки являются: передельный и литейный чугуны, доменные ферросплавы.*

*Побочные продукты: доменные шлаки и доменный газ.*

*Передельный чугун* предназначен для дальнейшего получения стали. На его долю приходится до 90 % производства чугуна. Обычно он содержит 3,8...4,4 % С; 0,3...1,2 % Si; 0,2...1,0 % Mn; 0,15...0,2 % P; 0,02...0,07 % S.

*Литейный чугун* содержит до 3,6 % Si и применяют его для получения отливок чугунных изделий. С низким содержанием фосфора (0,1...0,3 %) чугуны используют для высокопрочного литья, а содержащие 0,3...1,2 % P – для художественного литья.

*Доменные ферросплавы* используют при выплавке сталей для раскисления и легирования. Ферромарганец содержит 70...75 % марганца, ферросилиций – до 13 % кремния и до 3 % марганца.

*Доменный шлак* по мере накопления выпускают в ковши – шлаковозы вместимостью до 30 т. Шлак используют для получения строительных материалов.

*Доменный или колошниковый газ* после очистки от пыли используется как топливо для нагрева воздухонагревателей доменной печи, паровых и водяных котлов, а в смеси с коксовым и природным газом для отопления мартеновских и нагревательных печей. В крупных доменных печах в сутки выделяется около 15 млн.м<sup>3</sup> газа.

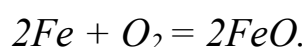
Доменный процесс получения чугунов требует значительного расхода кокса, флюсов, электроэнергии для подготовки дутьевого воздуха. Более экономичен процесс прямого восстановления железа из руд с последующей его плавкой в электропечах для получения стали. Согласно этому процессу руду сначала обогащают и получают окатыши. Окатыши загружают в шахтную печь, работающую по принципу противотока. Для восстановления железа из окатышей в печь подают смесь из природного и доменного газов, подвергнутых в специальной установке конверсии, в результате которой смесь разлагается на водород и оксид углерода. В восстановительной зоне печи создается температура 1000...1100 °С, при которой водород и оксид углерода восстанавливают железную руду в окатышах до твердого губчатого железа. Содержание железа в окатышах достигает 90...95 %. Охлаждение окатышей производится воздухом, подаваемым в нижнюю зону шахтной печи.

## 1.5. Металлургия стали

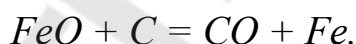
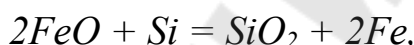
*Стальями* называются железоуглеродистые сплавы, содержащие до 2,14 % углерода (теоретически, а практически до 1,5 %). Кроме углерода углеродистая сталь всегда содержит в небольших количествах постоянные примеси: Mn до 0,8 %, Si до 0,4 %, P до 0,07 %, S до 0,06 %. Передельные чугуны же содержат до 4,4 % C, до 1,3 % Si, до 1,75 % Mn, до 0,3 % P и до 0,07 % S. Кроме углеродистых сталей широко применяются легированные стали, в состав которых входят дополнительно легирующие элементы: хром, никель, молибден, вольфрам, ванадий, титан, ниобий, бор и др. *Основными материалами для производства стали являются передельный чугун и стальной лом (скрап).*

Сущностью процесса металлургического передела чугуна в сталь является снижение содержания углерода и примесей путем их избирательного окисления и перевода в шлак и газы в процессе плавки. Примеси отличаются по своим физико-химическим свойствам, поэтому для удаления каждой из них в плавильном агрегате создают определенные условия в соответствии с основными законами физической химии.

Поскольку в чугуне содержится наибольшее количество железа, то в соответствии с *законом действующих масс* железо в первую очередь начинает взаимодействовать с кислородом в сталеплавильной печи:



Одновременно окисляются также Mn, Si, P, C и др. элементы. Образующийся оксид железа при высоких температурах растворяется в железе и отдает свой кислород более активным элементам – примесям в чугуне, окисляя их:



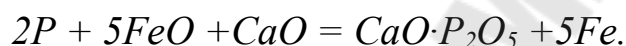
Чем больше  $FeO$  в расплаве, тем активнее идет окисление примесей. Поэтому в сталеплавильные печи к чугуну добавляют железную руду и окалину, содержащие большое количество  $FeO$ .

В соответствии с *принципом Ле Шателье* реакции, протекающие с выделением тепла, интенсивнее идут при более низких температурах или при некотором их понижении. Эндотермические реакции наоборот интенсивнее протекают при более высоких температурах или их повышении. Поэтому в начале плавки интенсивнее окисляются Si, Mn, P, а углерод сильно окисляется только при высоких температурах (в середине и в конце плавки).

После расплавления шихты в сталеплавильной печи вследствие различия плотностей образуется две несмешивающихся среды: жидкий металл и шлак. В соответствии с *законом Нернста* вещества, растворимые в двух соприкасающихся жидкостях, распределяются между ними в определенном соотношении, постоянном для данной температуры. Нерастворимые соединения в зависимости от их плотности

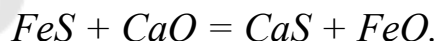
будут переходить в шлак или оседать в металл. Изменяя состав шлака и температуру можно менять соотношение между количеством примесей в металле и шлаке. Убирая шлак с поверхности металла и вводя определенные флюсы, можно удалять вредные примеси из металла.

Весь процесс плавки можно подразделить на три этапа: *расплавление шихты и нагрев ванны жидкого металла, «кипение» металлической ванны и раскисление стали*. На первом этапе температура невысока, происходит интенсивное окисление Fe и примесей Si, P, Mn. Наиболее важная задача на этой стадии – удаление фосфора. Плавку ведут в основной печи, в которой используют основной шлак, содержащий  $CaO$ . Фосфорный ангидрид, образующийся при взаимодействии  $FeO$  с фосфором, связывается оксидом кальция и переходит в шлак:



На этой стадии необходимо большое количество  $FeO$ , поэтому в процессе плавки в печь добавляют окалину и железную руду. Шлак, содержащий фосфор, убирают и наводят новый со свежими добавками  $CaO$ .

Второй этап – «кипение» металлической ванны начинается при более высоких температурах. Теперь более интенсивно идет процесс окисления углерода, для чего в металл вводят окалину, железную руду и вдувают кислород. Пузырьки  $CO$ , выделяющиеся из жидкого металла, вызывают «кипение» ванны. Частично при этом удаляются неметаллические включения, прилипшие к пузырькам  $CO$ , а также другие газы. На этой стадии создаются оптимальные условия для удаления серы, которая находится в виде сульфида железа ( $FeS$ ). Сульфид железа растворяется в основном шлаке



Сульфид кальция растворим в шлаке, но не растворим в железе, поэтому в итоге сера удаляется в шлак.

Третий этап - раскисление стали заключается в восстановлении оксида железа, растворенного в жидком металле, т.к. оксиды снижают механические свойства стали.

*Раскисление стали* производят двумя путями: осаждающим или диффузионным.

*Осаждающий процесс* осуществляется путем введения в жидкую сталь растворимых раскислителей: ферромарганца, ферросилиция и алюминия, которые в данных условиях обладают большим сродством к кислороду, чем железо. В результате восстанавливается железо и образуются оксиды  $MnO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , имеющие меньшую плотность и уходящие в шлак. *Диффузионное раскисление* осуществляется раскислением шлака. Для этого ферромарганец, ферросилиций и алюминий вводят в мелкоизмельченном виде в шлак. Эти соединения раскисляют  $FeO$  шлака, уменьшая его содержание в шлаке. Оксид железа из расплава переходит в шлак. В зависимости от степени раскисления выплавляются стали спокойные, полуспокойные и кипящие.

### **Способы получения стали**

Существует множество способов получения стали: бессемеровский и томасовский процессы, мартеновский, кислородно – конверторный, электроплавка в дуговых и индукционных печах, вакуумно – индукционный и электроннолучевой переплавы и др. Первыми массовыми способами были Бессемеровский (1855 г., Англия) и Томасовский (1878 г., Англия) процессы. Передел осуществлялся путем продувки воздухом расплава чугуна снизу. Недостатки: невысокое качество стали и ограниченность сырьевой базы (возможно использование лишь чугунов с определенным содержанием Si, S, P).

Мартеновский способ, разработанный во Франции отцом и сыном Мартенами в 1864 году, менее производителен, но качество металла выше. Этот метод допускает использование широкого круга чугунов и огромного количества вторичного металла. До 1970 года этот способ являлся основным.

Кислородно-конверторный способ разработан в 1959 г. в Австрии. Продувка кислородом обеспечила получение сталей, близких по качеству мартеновским.

Легированные высококачественные стали получают в основном в электродуговых и индукционных печах.

### ***Производство стали в мартеновских печах***

Мартеновский способ производства стали получил наибольшее распространение в России. Первая мартеновская печь емкостью 2,5 т была построена на Сорновском заводе в 1870 г. Мартеновская печь (рис 1.2) относится к пламенным отражательным регенеративным печам. Она имеет рабочее плавильное пространство, ограниченное сни-

зу подиной 1, сверху сводом 3, а по бокам передними и задними стенками. В передней части печи имеются загрузочные окна 4 для подачи шихты и флюса, а в задней на уровне подины – отверстия для выпуска готовой стали. Во время плавки эти окна забиты магнезитовым порошком. Через завалочные окна также удаляют и наводят шлак, берут пробы металла и шлака. Футеровка печи 2 может быть основной или кислой. Основную мартеновскую печь футеруют магнезитовым, а кислую – диновым кирпичом. Подину в первом случае набивают магнезитовым порошком, а во втором – кварцевым песком.

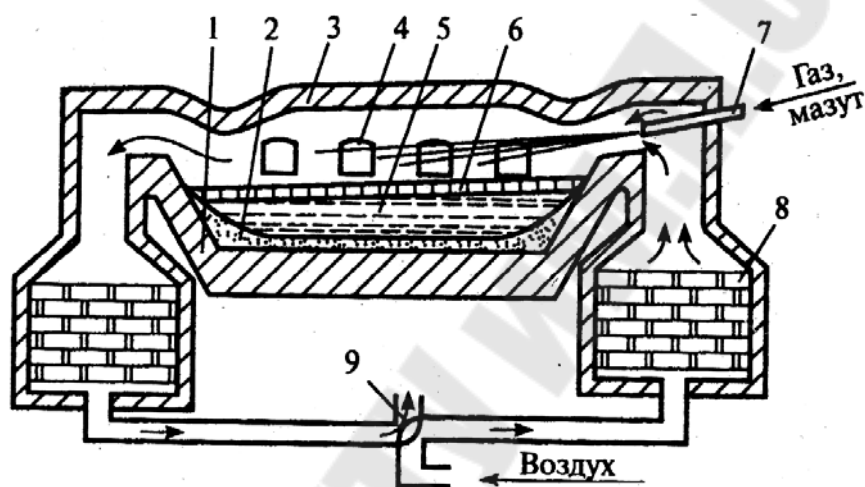


Рис. 1.2. Схема мартеновской печи для получения стали

В рабочем пространстве печи поступающее через форсунки 7 топливо смешивается с воздухом и сгорает, образуя факел пламени с температурой 1800...1900 °С. После расплавления шихты образуются слой металла 5 и слой шлака 6. Газообразные продукты имеющие температуру 1500...1550 °С отводят в регенераторы 8, в которых их тепло используется для подогрева дутьевого воздуха до 1100...1200 °С. В качестве топлива в мартеновских печах используют мазут или сжиженный газ. Длительность плавки от 3 до 18 часов в зависимости от емкости печи и марки выплавляемой стали. Среднесуточный съем стали с 1м<sup>2</sup> – 9т, расход топлива на 1т – около 200 кг. Из-за дороговизны и сложности этих печей с 1960 года прекращено их строительство.

В зависимости от состава шихты различают скрап-рудный и скрап процессы.

При скрап-рудном процессе в печь вводят 60-75% жидкого чугуна, 40...25 % скрапа, до 15 % железной руды и повышенное содержание флюса. Окисление примесей чугуна происходит за счет кислорода

руды. Плавка при основном скрап-рудном процессе делится на следующие периоды: заправка печи, завалка шихты, прогрев шихты, заливка чугуна, плавление, кипение, раскисление и выпуск готовой стали. Скрап-рудным процессом обычно выплавляют только углеродистые стали массового применения.

*При скрап процессе* шихта состоит из 60...70 % стального лома, 30...40 % чушкового передельного чугуна и извести в количестве 8...12 %. Этим методом ведут плавки на производствах, где нет доменных печей и жидкого чугуна.

### **Производство стали в кислородных конвертерах**

В 1855 г. англичанином Бессемером был разработан способ получения стали путем продувки жидкого чугуна сжатым воздухом при температуре 1200...1300°C. Плавильная печь представляла собой грушевидный стальной сосуд, футерованный диоксидом кремния. В 1878 г. кислая футеровка была заменена Томасом на основную (доломит), что позволило добавлять известь и перерабатывать чугуны с повышенным содержанием фосфора. Качество стали было низким: большая газогазованность, высокое содержание закиси железа, значительное содержание серы и фосфора.

Кислородно-конвертерный метод впервые начали применять в 1952-53 гг. в Австрии, хотя первые опыты были проведены в СССР Мозговым А.И. еще в 1933-34 гг. Количество примесей в кислородно-конвертерных сталях не выше, чем в мартеновских, а значит и свойства практически одинаковы для аналогичных марок. Но производительность кислородно-конвертерного способа значительно выше, чем мартеновского. Это сейчас основной вид плавки стали.

Корпус конвертера бочкообразной формы сварен из листовой стали толщиной от 40 до 100 мм, в зависимости от его емкости. Внутри наносится двух или трехслойная футеровка из основных огнеупорных материалов общей толщиной до 1000 мм. Стойкость футеровки до 400...800 плавов. Конвертер (рис.1.3) имеет возможность поворачиваться вокруг горизонтальной оси для выполнения технологических операций: завалки скрапа (а), заливки чугуна (б), слива стали (г) и шлака (д). Кислород подается под давлением 0,4...1,4 МПа через медные водоохлаждаемые фурмы (в), что обеспечивает хорошее перемешивание металла и шлака. Полезный объем конвертера может достигать до 350 т жидкого чугуна.

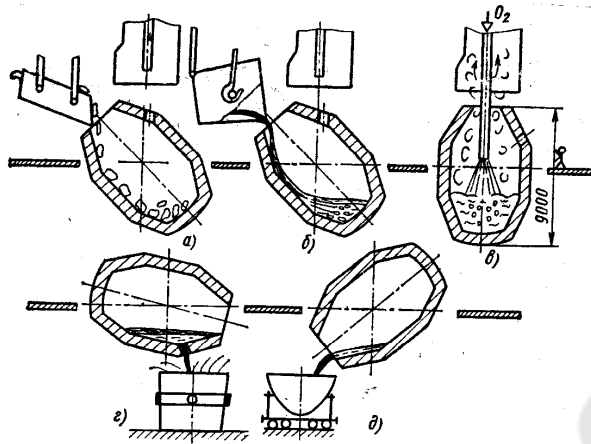


Рис. 1.3. Схема кислородно-конверторного передела чугуна

**Шихтовыми материалами** являются жидкий передельный чугун, стальной лом (до 30 %), железная руда, раскислители и легирующие добавки. Для разжижения шлака вводят боксит ( $Al_2O_3$ ) или плавиновый шпат ( $CaF_2$ ). Перед плавкой конвертер наклоняют на  $40...50^\circ$ , загружают скрап и заливают чугун при температуре  $1250...1400^\circ C$ . Конвертер в вертикальное рабочее положение, вводят внутрь фурму и подают кислород. Одновременно вводят известь, боксит, железную руду. Кислородная струя интенсивно перемешивает металл. В зоне контакта кислорода с чугуном происходят окислительные процессы, описанные выше, которые протекают с выделением теплоты, что приводит к повышению температуры до  $2400^\circ C$ . Подачу кислорода прекращают при достижении необходимого количества углерода в стали. После этого конвертер поворачивают и выпускают сталь в ковш, в котором производят раскисление стали. Затем из конвертера сливают шлак.

Этим методом производят конструкционные углеродистые и низколегированные стали. Длительность плавки емкостью 130..300 т составляет 25...50 минут.

В зависимости от степени раскисления выпускают *стали кипящие, полуспокойные и спокойные*. Кипящие стали для удаления из расплава окиси железа модифицируют (раскисляют) только марганцем. Для этого в момент заполнения сталелитейного ковша готовой сталью в расплав добавляют ферромарганец. В *кипящих сталях* к моменту разлива стали на слитки процесс пузырькового кипения еще не заканчивается и в слитках содержится большое количество пузырей по всему сечению. Выход годного металла составляет до 95 %. Слитки кипящей стали в основном используют для получения листового проката, а также для изготовления неотчетливых деталей.



В *спокойных сталях* процесс пузырькового кипения на момент разлива стали полностью заканчивается. Это обусловлено тем, что для раскисления металла последовательно используют марганец, кремний и алюминий. Вначале при заполнении ковша вводят ферромарганец или силикомарганец, затем ферросилиций и в последнюю очередь алюминий. Слиток получается плотный, без внутренних пор, но имеет большую усадочную раковину в верхней части слитка. Выход годного металла составляет до 85 %. Дендритная ликвация в крупных слитках такой стали при их прокатке или ковке приводит к появлению полосчатой структуры. Это вызывает анизотропию механических свойств. Пластические свойства стали в поперечном (по отношению к направлению прокатки иликовки) значительно ниже, чем в продольном.

В последнее время широко применяют полуспокойные стали. Выход годного металла в слитке полуспокойной стали достигает 90%, что достигается за счет уменьшения объема усадочной раковины ввиду сохранения некоторого объема пор в верхней части слитка. Раскисление полуспокойной стали производят путем последовательного введения в расплав ферромарганца и ферросилиция.

При производстве легированных сталей легирующие элементы вводят в зависимости от природы металлов, непосредственно в процессе получения стали или в момент разливки ее в ковш. На стадии получения стали вводят легирующие элементы, сродство которых кислороду меньше, чем у железа, например, Ni, Co, Mo, Cu, и др., которые в расплавленной стали не окисляются. Легирующие элементы, сродство кислороду которых выше, чем у железа, способные окисляться в процессе плавки (Si, Mn, Cr, Al, V, Ti и др.) вводят как можно ближе к окончанию плавки или на стадии слива стали в разливочный ковш. Легированные стали по степени раскисления получают только спокойными.

Кислородно-конвертерный метод производства стали не требует топлива, т.к. разогрев металла идет за счет теплоты, выделяемой в результате металлургических процессов, характеризуется высокой производительностью. Но это производство привязано к доменному цеху.

#### ***Производство стали в электропечах***

Основным преимуществом данного вида выплавки стали является отсутствие окислительной атмосферы в рабочем пространстве печи, что позволяет получать чистый от вредных примесей и газов металл, использовать легирующие элементы любой тугоплавкости. В

электрических печах выплавляют высококачественные конструкционные, инструментальные, коррозионно-стойкие, жаростойкие и другие специальные стали и сплавы.

В основном применяют два типа печей: *дуговые и индукционные*.

### ***Дуговые печи***

*Дуговые печи* работают на принципе использования тепла электрической дуги, образующейся между графитовыми электродами и металлической ванной. Печь состоит из цилиндрического кожуха 4, футерованного изнутри 5, со сферическим днищем 1 (рис. 1.4). Свод печи 6 выкладывают из диасового или хромомagneзитового кирпича. Имеются загрузочные 10 и выпускные отверстия 2, в своде выполнены отверстия для электродов 9, к которым подводится трехфазный переменный ток 7 напряжением 160...600 В. Расстояние между электродами 9 и шихтой 3 регулируется путем перемещения электродов, что позволяет регулировать мощность дуги и поддерживать необходимую температуру в зоне расплава. Сила тока составляет 1...10 кА. Температура дуги в рабочей зоне достигает до 3000 °С. Обычно строятся печи емкостью от 0,5 до 400 т. Специальное устройство 11 позволяет наклонять печь под углом до 40... 45° в сторону выпускного отверстия для слива металла 2 и на 10... 15° в сторону рабочего окна для слива шлака 10.

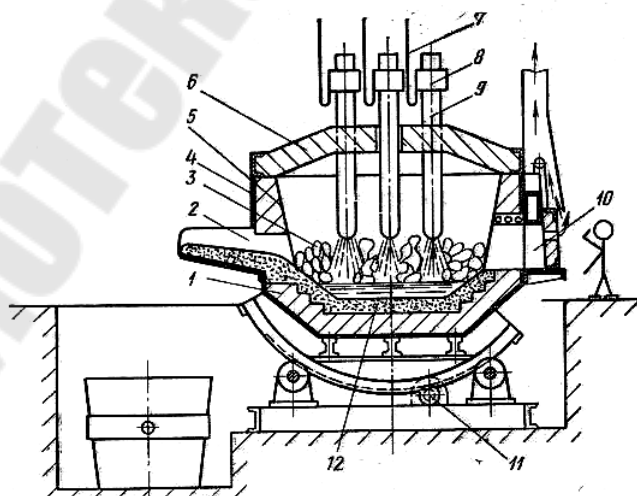


Рис. 1.4. Схема электродуговой плавильной печи

Плавку производят следующим образом. При снятом своде сначала загружают в печь ферросплавы и алюминий совместно с флюсами, легированный лом или лом углеродистых сталей с передельным чугуном и коксом. Закрывается свод печи и возбуждается электрическая дуга, расплавляющая металлолом, при этом температура расплава достигает 1540 °С. Происходит интенсивное окисление железа, кремния, марганца, фосфора и частично углерода кислородом воздуха. Добавление руды и извести через загрузочное окно способствует снижению количества углерода и примесей в расплаве. Раскисление стали и удаление из нее серы проводят путем введения силикомарганца и силикокальция, образующих шлак, содержащий большое количество оксида кальция, переводящего серу в шлак. После наведения шлака его раскисляют силикомарганцем и силикокальцием. Восстановление  $FeO \rightarrow Fe$  и переход железа в расплав вызывают обратный переход  $FeO$  в шлак из расплава. Это дает практически полное раскисление стали. Легирование не окисляющимися легирующими элементами (Ni, Mo) проводят прямо во время плавки, а легкоокисляющимися – перед выпуском стали из печи или в ковше. Продолжительность плавки в электродуговых печах зависит от их емкости и составляет 4...6 часов, расход электроэнергии при работе на твердой шихте находится в пределах 700...900 кВт на 1 т стали. Расход электродов составляет 7-9 кг на одну тонну выплавленной стали.

#### ***Индукционная тигельная плавильная печь***

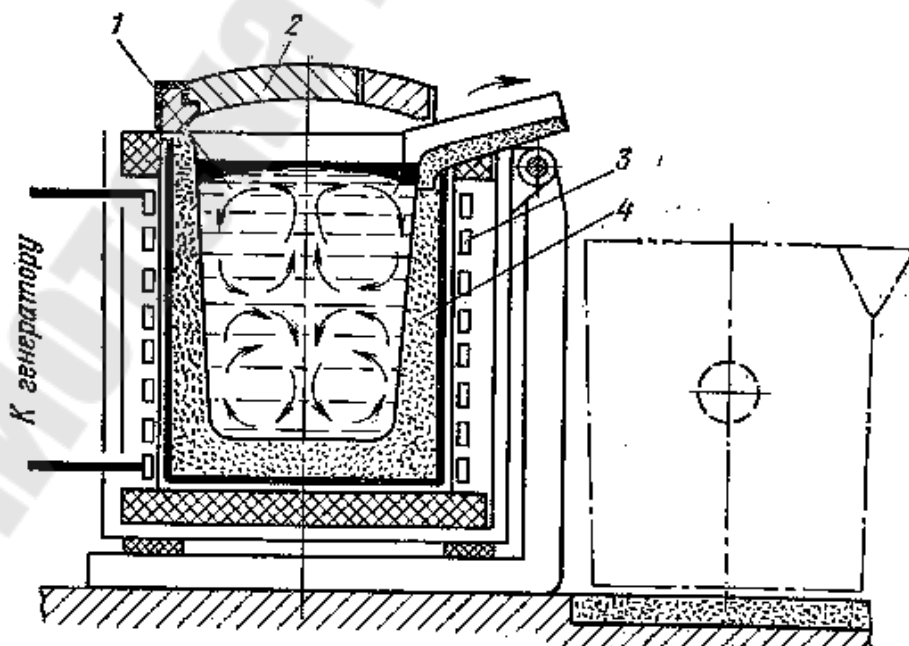


Рис. 1.5. Схема индукционной плавильной печи

Тигель 4, в котором плавится металл 1, размещен внутри водоохлаждаемого индуктора 3, через который проходит однофазный переменный ток повышенной частоты 500...2000 Гц. Под действием переменного магнитного потока, пронизывающего куски металла, в них наводятся мощные вихревые токи (Фуко), нагревающие металл до нужной температуры. Кроме того, циркуляция металла под действием переменного тока приводит к интенсивному перемешиванию расплава и удалению из него примесей. В зависимости от технологического процесса плавки тигли футеруют кирпичем 4 из кислых или основных огнеупоров. Вместимость тигля от 60 кг до 25 т.

Шихту приготавливают из не содержащих вредных примесей материалов и загружают в тигель сверху. Во время плавки в тигель вводят шлаковую смесь на основе извести или кремнезема в зависимости от футеровки печи. Проводят химический анализ, раскисление и легирование стали.

***Преимущества индукционной печи по отношению к дуговой:***

- отсутствие электрической дуги, что позволяет выплавлять стали с малым содержанием углерода и малым угаром элементов;
- электродинамические силы, возникающие в металле, обеспечивают хорошее его перемешивание, выравнивание химического состава и всплывание неметаллических включений;
- небольшие размеры тигля позволяют помещать его в камеру, в которой можно создавать любую контролируемую атмосферу или вакуум.

Однако эти печи имеют малую стойкость футеровки и температура шлака в них недостаточна для протекания металлургических процессов между металлом и шлаком.

В индукционных печах выплавляют стали и сплавы из легированных стальных отходов методом переплава или из чистого шихтового железа и скрапа с добавками ферросплавов методом сплавления. В печах с основной футеровкой выплавляют высококачественные легированные стали с высоким содержанием марганца, никеля, алюминия, титана, а в кислых печах – конструкционные стали, легированные другими элементами. Индукционные печи позволяют производить плавку в контролируемой атмосфере и в вакууме до 1,4 Па. Выплавка в вакуумных индукционных печах обеспечивает получение плотного металла с минимальным содержанием газов и неметаллических включений.

## Разливка стали

Выплавленную сталь выпускают из плавильной печи в разливочный ковш, из которого ее *разливают в изложницы или кристаллизационные машины для непрерывного литья заготовок*. Внутренняя полость разливочного ковша выполняется из огнеупорных материалов. В днище его имеется специальное отверстие, закрываемое огнеупорной пробкой, подъем которой обеспечивает слив металла. Емкость разливочных ковшей достигает до 480 т. *Изложницы* представляют собой чугунные формы для изготовления слитков квадратного, круглого, прямоугольного или многогранного сечения. Слитки квадратного сечения переделывают в сортовой прокат, прямоугольного сечения – на лист, круглого – для изготовления труб, многогранные – для поковок. Для прокатки изготавливают слитки массой от 200 кг до 25 т, для поковок – до 300 т и более. Обычные углеродистые стали разливают в слитки массой до 25 т, легированные и высококачественные стали – в слитки массой от 500 кг до 7 т, некоторые высоколегированные стали – массой несколько килограммов.

Разливку сталей в изложницы производят сверху и снизу за счет гидростатического давления (сифоном) и на машинах непрерывного литья (рис. 1.6). При разливке сверху, каждая изложница из разливочного ковша 1 заполняется отдельно, а при сифонной разливке происходит одновременное заполнение металлом нескольких изложниц 5 снизу через центральный стояк 3 и каналы поддона 6, футерованные шамотом 4 и 7.

При разливке сверху происходит разбрызгивание металла, что ухудшает качество поверхности слитка. При сифонной разливке исключается разбрызгивание металла, но металл загрязняется неметаллическими включениями. Крупные слитки обычно отливают сверху, мелкие и средние – сифоном. Разливка сифоном обеспечивает лучшее качество поверхности слитков, но требует более высокой температуры разливаемого металла, увеличивает потери металла на литники. В связи с уменьшением объема стали при затвердевании (около 3 %) происходит усадка металла и образование усадочных раковин и усадочной пористости, особенно при разливке спокойных сталей, что приводит к переходу до 25 % слитка в отходы. С целью повышения выхода годного литья применяют футерованные 9 прибыльные надставки 8, которые осуществляют подпитку металлом затвердевающего слитка.

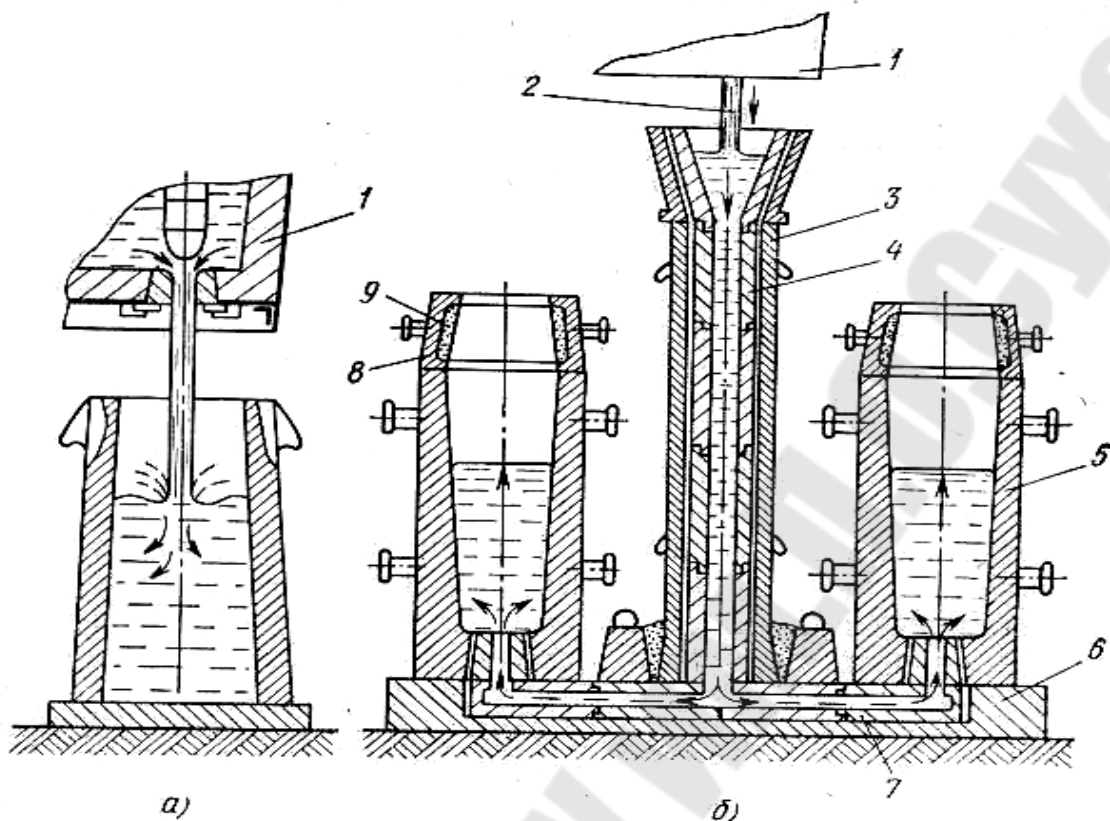


Рис. 1.6. Схемы разливки стали: *а* – сверху; *б* – снизу (сифоном)

Более совершенным методом, позволяющим уменьшить отходы и повысить качество стали, является непрерывная разливки стали (рис.1.7). Суть метода состоит в том, что жидкую сталь из ковша 2 через промежуточное устройство 3 непрерывно подают в водоохлаждаемый кристаллизатор 1, из нижней части которого вытягивают затвердевающий слиток. В кристаллизаторе образуется наружная твердая корка слитка, внутренняя часть которого в этот момент остается жидкой, что позволяет избежать образования усадочных раковин и пор, за счет пополнения объема отливки жидким металлом. Перед заливкой металла в кристаллизатор вводят затравку, образующую его дно. Жидкий металл, попадая в кристаллизатор и на затравку, охлаждается, затвердевает и соединяется с затравкой. Затравка с помощью валков 7 вытягивается из кристаллизатора вместе с затвердевающим слитком.

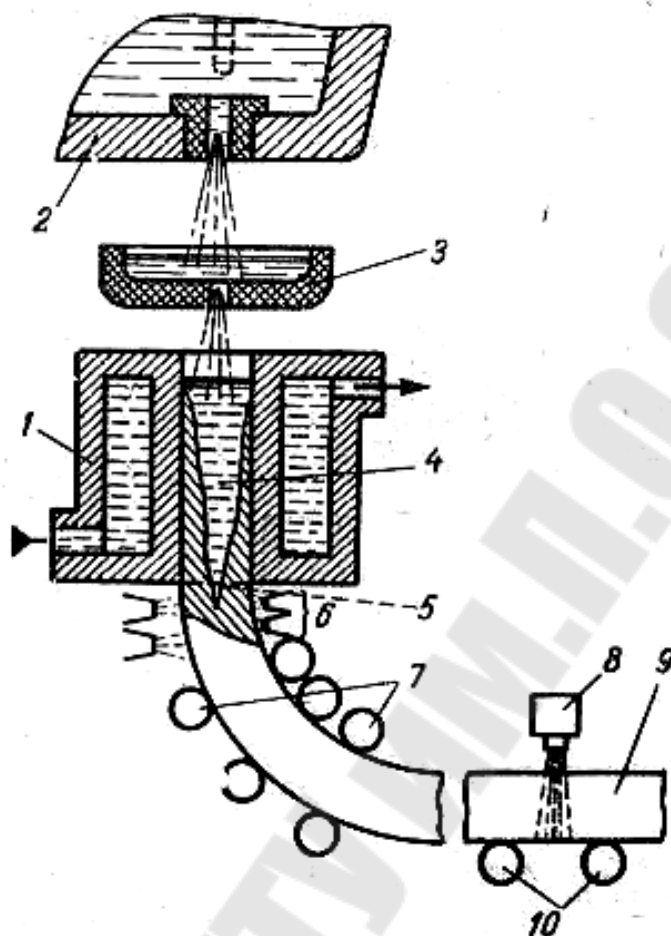


Рис. 1.7. Схема установки непрерывной разливки стали

Скорость процесса зависит от размеров слитка, например, для слитка  $150 \times 500$  мм составляет 1 м/мин. На выходе из кристаллизатора слиток охлаждается водой 6 и попадает в зону резки 10, где разрезается на заготовки заданного размера газокислородным резаком 8. Слитки имеют плотное строение, мелкозернистую структуру без усадочных раковин. Выход годных заготовок составляет 96...98 %.

#### Способы повышения качества сталей

Уменьшить количество вредных примесей, газов и неметаллических включений в металле можно путем обработки его синтетическим шлаком, вакуумной дегазации, плавки в вакуумных печах, электрошлакового переплава (ЭШП), вакуумно-дугового переплава (ВДП), вакуумно-индукционного переплава (ВИП), переплава металла в электронно-лучевых и плазменных печах.

**Обработка синтетическими шлаками** заключается в следующем. Приготавливают известково-глиноземный шлак, состоящий из 40 %  $Al_2O_3$ , 55 %  $CaO$ , небольшого количества  $SiO_2$ ,  $MgO$  и  $FeO$ , который расплавляется в электродуговой печи и затем выливается в

ковш. Затем в ковш заливают жидкую сталь, которая интенсивно перемешивается с расплавленным шлаком. Между расплавленными металлом и шлаком многократно возрастает поверхность взаимодействия. Это увеличивает скорость протекающих металлургических реакций. Обработанные таким образом стали, содержат меньше серы, кислорода и неметаллических включений, имеют лучшую пластичность и более высокие прочностные свойства.

**Вакуумную дегазацию** проводят для уменьшения содержания в металле газов и неметаллических включений. Ковш с жидким металлом помещают в герметичную камеру, в которой создается разрежение до  $0,267 \dots 0,667$  кПа. При этом из стали выделяются водород и азот, всплывающие пузырьки газа попутно захватывают неметаллические включения. Все это способствует улучшению качества стали и повышению ее прочности.

**Электрошлаковому переплаву** (рис.1.8) подвергаются стали в виде кованных или катанных прутков круглого или квадратного сечения, выплавленных в электродуговых печах. Источником теплоты является шлаковая ванна 2, нагреваемая при прохождении через нее переменного электрического тока (около 20А на 1 мм диаметра электрода при напряжении 45...60 В). Ток подводится к переплавляемому электроду 1 и поддону 8, установленному в водоохлаждаемом металлическом кристаллизаторе 7. Выделяющаяся в шлаковой ванне теплота (температура до  $1700 \dots 2000$  °С) вызывает оплавление электрода. Капли расплава металла проходят через шлак, образуют под ним металлическую ванну 4. Проходя через основной шлак, они очищаются от серы, газов и неметаллических включений.

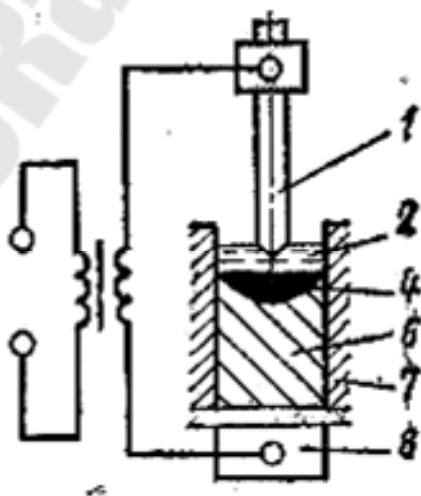


Рис. 1.8. Схема установки электрошлакового переплава



Количество серы уменьшается в 1,5...2 раза, а неметаллических включений – в 2...3 раза. За счет направленной кристаллизации слиток 6 получается однородным, плотным и прочным. ЭШП используется при получении высококачественных сталей для шарикоподшипников, жаропрочных сталей для дисков и лопаток турбин, авиационных конструкций.

**Вакуумно-дуговой переплав** (рис. 1.9) осуществляют в печах с расходуемым электродом. Электрод 3 закрепляют на водоохлаждаемом штоке 2, помещают в корпус печи 1 и далее в медную водоохлаждаемую изложницу 6. Откачивают из печи воздух до давления менее 13 Па. При подаче напряжения между расходуемым электродом – катодом и затравкой – анодом 8 возникает дуга. Выделяющаяся теплота расплавляет конец электрода. Капли жидкого металла, проходя зону дугового разряда, дегазируются, заполняют изложницу и быстро охлаждаются за счет циркуляции воды внутри медной изложницы и затвердевают, образуя слиток 7.

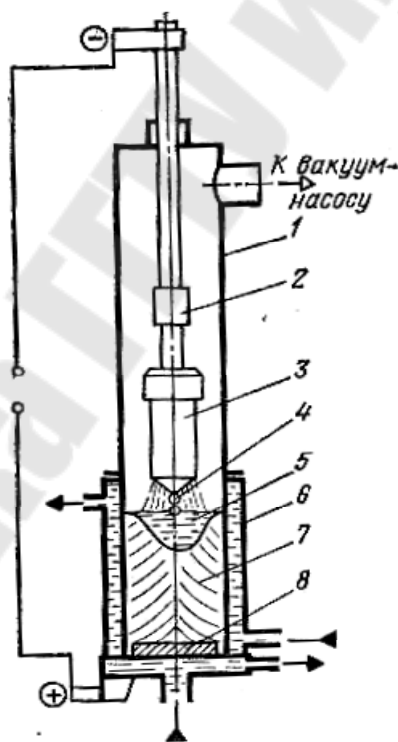


Рис. 1.9. Схема установки вакуумно-дугового переплава

Расплавленная зона находится лишь на поверхности слитка где температура достигает до 3000 °С. Дуга 4 горит между электродом 3 и жидким металлом 5 на протяжении всей плавки. Вследствие направленной кристаллизации неметаллические включения сосредотачива-

ются в верхней части слитка. Усадочная раковина в слитке мала. Металл отличается равномерностью химического состава.

**Плавка в электронно-лучевых печах** применяется для получения чистых и ультрачистых тугоплавких металлов (молибдена, ниобия, циркония и др.), для выплавки специальных сплавов и сталей. Источником теплоты в этих печах является энергия, выделяющаяся при торможении свободных электронов, пучок которых направлен на металл. Управление процессом плавки осуществляется электронной пушкой. Плавление и затвердевание металла происходит в вакууме  $1,33 \cdot 10^{-3}$  кПа в водоохлаждаемых кристаллизаторах. Затвердевающий слиток вытягивается вниз.

**В плазменно-дуговых печах** получают высококачественные стали и сплавы, используя в качестве источника теплоты низкотемпературную плазму, создаваемую в плазменных горелках. Плавку проводят обычно в нейтральной контролируемой среде (аргон, гелий).

## 1.6. Производство цветных металлов

### 1.6.1. Производство меди

Медь один из важнейших металлов, который по электропроводности уступает лишь серебру и является главным проводниковым материалом. Электро- и радиотехническая промышленности потребляют почти половину всей получаемой меди. В машиностроении применяются в основном сплавы меди – бронзы и латуни.

Медь встречается в природе в основном в виде сернистых соединений  $CuS$ ,  $Cu_2S$  в составе сульфидных руд, реже в виде  $Cu(OH)_2$  и  $Cu_2O$ ,  $CuCO_3$  и самородной меди. Наиболее распространенные в СНГ руды: медный колчедан или халькопирит ( $CuS \cdot FeS$ ) и медный блеск или халькозин ( $Cu_2S$ ). Все медные руды являются бедными и содержат менее 1 % меди. Пустая порода состоит в основном из песчаников, глины и известняка.

Медь в основном получают *пирометаллургическим способом* путем восстановления ее из медных руд. Процесс включает в себя: *обогащение руды с получением концентрата, его обжиг, плавку на полупродукт – штейн, выплавку из штейна черновой меди, ее рафинирование.*

После обогащения медной руды методом флотации получают концентрат, содержащий до 35 % меди, который подвергается окис-

лительному обжигу при температуре 600...700 °С для уменьшения содержания серы (удаляется до 50 %). Продукт обжига называется *огарком*. Образующийся при этом сернистый газ  $SO_2$  используется для получения серной кислоты. Полученные огарки переплавляют в отражательных или электрических печах при температуре 1500...1600 °С для получения штейна, сплава  $Cu_2S$  и  $FeS$ , содержащего 20...60 % меди, 10...60 % железа, 20...25 % серы с температурой плавления 900...1000 °С.

Расплавленный медный штейн заливают в горизонтальные конвертеры и продувают воздухом для окисления сульфидов меди и железа. Образующиеся оксиды железа ошлаковываются кремнеземом флюса и железистый шлак периодически удаляется через горловину. Сера удаляется в виде сернистого газа  $SO_2$ . Получаемая черновая медь содержит до 98,4...99,4 % меди и небольшое количество примесей (Fe, Ni, Pb и др.). Полученную медь разливают в изложницы.

Для удаления примесей и газов черновую медь рафинируют. Сначала проводят огневое рафинирование в отражательных пламенных печах, при котором окисляются примеси S, Fe, Ni, As, Sb и др., подаваемым в печь кислородом. Образовавшиеся оксиды примесей, нерастворимые в меди, переходят в шлак. После скачивания шлака металл раскисляют, перемешивают природным газом и получают медь с чистотой 99,0...99,5 %. Из нее отливают чушки для получения бронз и латуней или плиты для электролитического рафинирования.

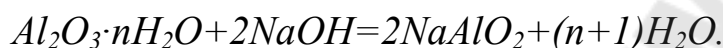
*Электролитическое рафинирование* проводят для получения чистой от примесей меди (99,5 % Cu). Электролиз ведут в ваннах, облицованных внутри винипластом или свинцом, в водном растворе медного купороса и серной кислоты. В качестве анода применяют медь после огневого рафинирования, а катодом служит пластина чистой меди. При пропускании постоянного тока напряжением 2...3 В и плотностью 100...260 А/м<sup>2</sup> анод растворяется, а на катоде оседает чистая медь. Примеси осаждаются на дно ванны. Катодную медь промывают, переплавляют в плавильных печах и разливают в слитки.

## 1.6.2. Производство алюминия

По объемам производства алюминий занимает в настоящее время первое место среди цветных металлов. Алюминий широко используется как проводниковый материал и материал для теплотехнических устройств. Деформируемые алюминиевые сплавы являются

важнейшим конструкционным материалом в авиации, судостроении и других областях техники, в химической и пищевой промышленности. Широко применяются и литейные сплавы.

*Основное сырье* для производства алюминия – алюминиевые руды: бокситы, нефелины, алуниты, каолины. Наибольшее значение имеют бокситы. Алюминий в них содержится в виде минералов – гидроксидов  $Al(OH)_3$ ,  $AlOOH$ , корунда  $Al_2O_3$  и каолинита  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ . Алюминий получают путем электролиза глинозема – оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) в расплавленном криолите ( $Na_3AlF_6$ ) с добавлением фтористых алюминия и натрия ( $AlF_3$ ,  $NaF$ ). Производство алюминия включает следующие стадии: получение безводного глинозема; получение криолита из плавикового шпата; электролиз глинозема в расплавленном криолите. Глинозем получают из бокситов путем их обработки щелочью



Получившийся алюминат натрия подвергают гидролизу:



Производят обезвоживание образовавшегося гидроксида алюминия во вращающихся печах при температуре 1150...1200 °С и получают обезвоженный глинозем  $Al_2O_3$ .

Электролиз глинозема для получения металлического алюминия проводят в электролизерах. Ванна из углеродного материала является катодом. В качестве анода используются самообжигающиеся угольные электроды, помещенные в специальное анодное устройство. Нижняя часть электрода погружена в электролит-расплав, состоящий из глинозема 8...10 %  $Al_2O_3$  и криолита  $Na_3AlF_6$ . Электролит нагревается до температуры около 1000 °С за счет постоянного тока плотностью 0,7...1,2 А/см<sup>2</sup> напряжением 4...4,5 В, протекающего между электродами. Криолит и глинозем диссоциируют и на катоде разряжаются ионы  $Al^{3+}$  и образуется алюминий, а на аноде – ион  $O^{2-}$ , который окисляет углерод до  $CO$  и  $CO_2$ , удаляющихся из ванны через вентиляционную систему. Алюминий собирается на дне ванны под слоем электролита. Его периодически извлекают посредством специального устройства. Такой алюминий называют *сырцом*. В нем имеются металлические и неметаллические примеси.

Удаление примесей проводят путем продувки хлора через расплав алюминия. Образующийся парообразный хлористый алюминий,

проходя через расплав, обволакивает частички примесей, увлекая их за собой. Жидкий алюминий выдерживают в ковше 30 – 40 минут при температуре 690...730 °С для всплывания металлических включений и выделения газов, затем его разливают. После рафинирования чистота алюминия составляет 99.5...99,85 %.

### 1.6.3. Получение магния

Магний применяется для создания сплавов с алюминием, медью и марганцем, в производстве титана, для получения высокопрочного чугуна и др. *Основным сырьем* для получения магния являются: карналлит ( $MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$ ), магнезит ( $MgCO_3$ ), доломит ( $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ ), бишофит ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ). Наибольшее количество магния получают из карналлита. Сначала его обогащают и обезвоживают. Безводный карналлит ( $MgCl_2 \cdot KCl$ ) используют для приготовления электролита.

*Электролиз* осуществляется в электролизере, футерованном шамотным кирпичем. В качестве анода используют графитовые пластины, а катода – стальные пластины. Электролитом служит расплав состава: 10 %  $MgCl$ , 45 %  $CaCl_2$ , 30 %  $NaCl$ , 15 %  $KCl$  с небольшими добавками  $NaF$  и  $CaF_2$ . Рабочее напряжение составляет 5... 7 В, плотность тока 0,4...0,6 А/см<sup>2</sup>, температура электролита 700...750 °С.

В процессе электролиза магний выделяется на катоде в виде капелек, которые затем укрупняются и всплывают. Расплавленный магний периодически удаляют при помощи сифона и вакуумного ковша.

*Черновой магний* содержит около 5 % примесей, поэтому его рафинируют переплавкой с флюсом в электропечах. В качестве флюса используют хлориды магния, калия, бария, натрия, кальция и фтористый кальций. Температура переплава 700...750°С. Печь охлаждают до 670 °С и магний разливают в изложницы на чушки.

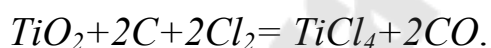
### 1.6.4. Производство титана

Промышленное производство титана началось в 50 годах двадцатого столетия и получило быстрое развитие. Титановые сплавы имеют наибольшую удельную прочность среди всех металлических материалов, а также высокую жаропрочность и коррозионную стойкость. Эти сплавы находят все более широкое применение в авиаци-

онной технике, в химическом машиностроении и в других отраслях промышленности. Титан также используется для легирования сталей.

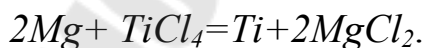
*Сырьем для получения титана служат титансодержащие минералы: рутил, содержащий до 90 %  $TiO_2$  и ильменит  $TiO_2 \cdot FeO$  (около 60 %  $TiO_2$ ). Весь процесс производства титана включает следующие стадии: добыча титановой руды → обогащение → плавка на титановый шлак → получение четыреххлористого титана → восстановление титана магнием.* Из титано-магнетитовой руды путем обогащения получают ильменитовый концентрат, содержащий 40...45 %  $TiO_2$ , около 30 %  $FeO$ , 20 %  $Fe_2O_3$  и 5...7 % пустой породы. Плавку на титановый шлак проводят в электродуговой печи. Шихтой служат брикеты из мелкоизмельченного ильменитового концентрата, антрацита (угля) и сульфитного щелока. В результате плавки получают богатый титановый шлак, содержащий до 80 %  $TiO_2$ . Побочным продуктом является чугуны, содержащий до 0,5 %  $Ti$ . Измельченный шлак подвергают магнитной сепарации (для удаления железосодержащих частиц), смешивают с мелким нефтяным коксом и связующим и спрессовывают в брикеты. После обжига при температуре 700...800 °С брикеты направляют на хлорирование.

Хлорирование проводится в специальных герметизированных электропечах. Нижняя часть печи заполняется графитовой насадкой, которая нагревается при пропускании электрического тока. В печь подают брикеты титанового шлака, а через фурмы внутрь печи - хлор. При температуре 800...1250 °С в присутствии углерода образуется  $TiCl_4$ , а также хлориды магния, кальция и др.



Четыреххлористый титан отделяется и очищается от остальных хлоридов благодаря различию температур их кипения в специальных ректификационных колоннах.

Восстановление титана из  $TiCl_4$  производится в герметических реакторах при температуре 950...1000 °С магнием



Загружают в реактор чушковый магний, откачивают воздух, заполняют его очищенным аргоном и подают внутрь  $TiCl_4$ . Частицы восстановленного титана спекаются в пористую массу (титановую губку), а жидкий  $MgCl_2$  выпускают через летку реактора. Губка титана содержит 35...40 % магния и  $MgCl_2$ . Для удаления примесей про-

водят рафинирование при температуре 950...1000 °С в вакууме при степени разрежения около 0,133 Па.

Титановые слитки получают переплавкой титановой губки в вакуумных электрических дуговых печах. Для получения чистого титана делают двойной переплав.

### Вопросы для самопроверки

1. Какое сырье и вспомогательные материалы используются в металлургическом производстве?
2. В чем заключается подготовка руды к плавке при производстве чугуна?
3. В чем сущность технологического процесса получения чугуна?
4. Назовите основные продукты доменной плавки.
5. В чем сущность технологии получения стали?
6. Особенности получения стали кислородно-конверторным методом.
7. Особенности получения стали в электропечах.
8. Методы разливки стали и их особенности.
9. Назовите методы повышения качества стали.

## Глава 2. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Поверхность детали, в результате обработки, приобретает неровности в виде выступов и впадин. В некоторых случаях неровности можно рассмотреть невооруженным взглядом. Наиболее мелкие из них обнаруживаются только с помощью специальных приборов. Оценка относительной высоты неровностей выполняется в соответствии с требованиями ГОСТ 2789—73 и ГОСТ 2.309—73. Эти стандарты устанавливают все необходимые параметры, регламентирующие *совокупность относительных неровностей поверхности измеренную в пределах некоторой базовой длины*, которую в технике называют **шероховатостью** поверхности. По сравнению с другими геометрическими характеристиками поверхности шероховатость характеризуется наименьшей величиной шага между неровностями  $S$  величину которого сравнивают с высотой неровностей  $R$  (рисунок 2.1).

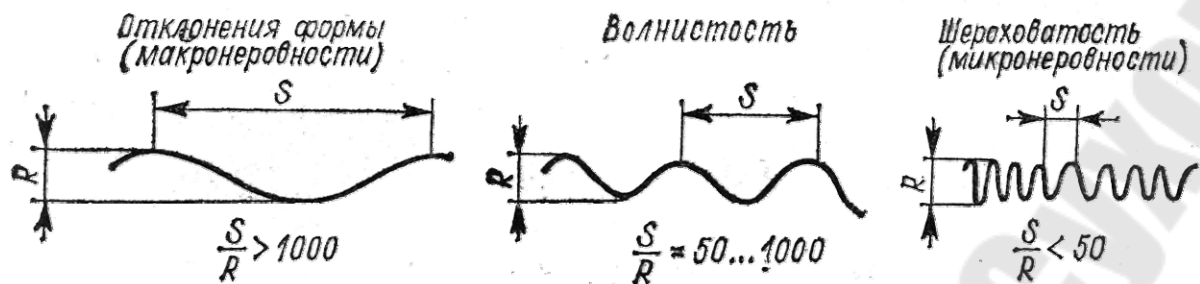


Рис. 2.1. Классификация геометрических характеристик поверхности

Стандарты устанавливают следующие параметры для характеристики шероховатости поверхности:

- $R_a$  — среднее арифметическое отклонение профиля;
- $R_z$  — высота неровностей профиля по десяти точкам;
- $R_{max}$  — наибольшая высота неровностей профиля;
- $S_m$  — средний шаг неровностей;
- $S$  — средний шаг неровностей по вершинам и др.

Числовые значения параметров шероховатости оцениваются в нормальном сечении. Ориентация секущей плоскости не оговаривается, если требования технической документации относятся к направлению сечения на неровности, которые соответствуют наибольшим значениям высотных параметров. Сечение поверхности, перпендикулярной к ней плоскостью дает представление о профиле рельефа: о количестве, форме и величине выступов и впадин неровностей (рисунок 2.2). Практически высота выступов и впадин микронеровностей поверхности находится в пределах от 0,08 до 500 мкм. Наиболее часто для обозначения шероховатости поверхности применяются — среднее арифметическое отклонение профиля ( $R_a$ ) и высота неровностей профиля по десяти точкам ( $R_z$ ), которая по своей геометрической сути является наибольшей высотой неровностей профиля ( $R_{max}$ ). *Средней линией профиля* — называется базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины среднеквадратическое отклонение профиля до этой линии минимально. Линия, эквидистантная средней линии и проходящая через высшую точку профиля в пределах базовой длины, называется *линией выступов профиля*. Линия, эквидистантная средней линии и проходящая через низшую точку профиля в пределах базовой длины, называется *линией впадин профиля*. Расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины представляет собой *наибольшую высоту неровностей профиля*  $R_{max}$ .



Для оценки шероховатости в машиностроении получил широкое распространение высотный критерий - высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$ , который представляет собой сумму средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов и глубин наибольших впадин профиля в пределах базовой длины  $l$ .

$$R_z = \frac{\sum_1^5 |h_{\max}| + \sum_6^{10} |h_{\min}|}{10}.$$

Столь же большое значение в машиностроении при оценке шероховатости поверхности имеет и критерий  $R_a$ . *Среднее арифметическое отклонение  $R_a$*  профиля — есть среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины  $l$ , т.е.

$$R_a = \frac{\sum^n |y_i|}{n}.$$

Базовая длина определения параметров профиля поверхности назначается исходя из величины или  $R_a$  или  $R_z$  (таблица 2.1).

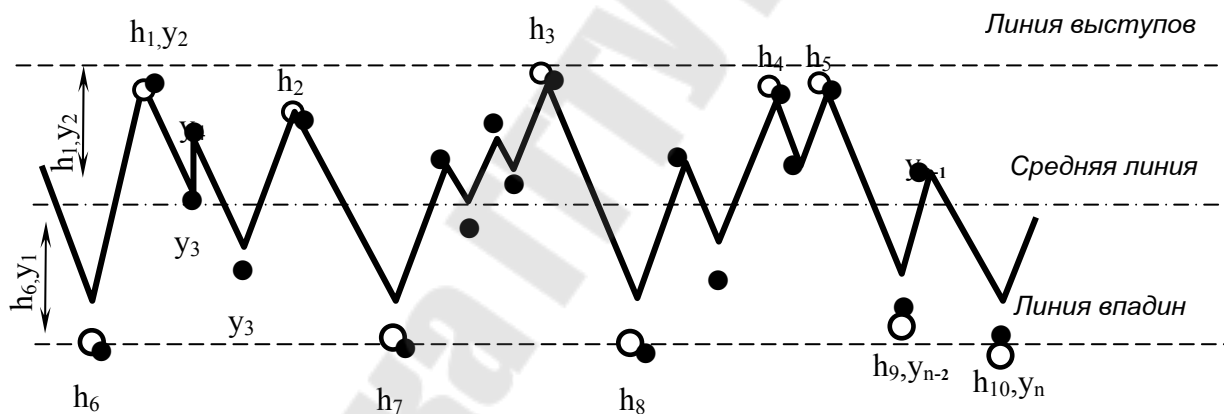


Рис. 2.2. Профиль шероховатости поверхности и его характеристики

Таблица 2.1

Соотношение значений между параметрами  $R_a$  и  $R_z$  ( $R_{\max}$ ) и базовой длиной  $l$

$R_a$ , мкм	$l$ , мм	$R_z = R_{\max}$ , мкм	$l$ , мм
До 0,025	0,08	До 0,10	0,08
Св. 0,025 » 0,4	0,25	Св. 0,10 » 1,6	0,25
» 0,4 » 3,2	0,8	» 1,6 » 12,5	0,8
» 3,2 » 12,5	2,5	» 12,5 » 50	2,5
» 12,5 » 100	8,0	» 50 » 400	8

Шероховатость поверхности обозначают на чертеже для всех выполняемых по данному чертежу поверхностей изделия, независимо от методов их образования, кроме поверхностей, шероховатость которых не обусловлена требованиями конструкции. Структура обозначения шероховатости поверхности приведена на рисунке 2.3.

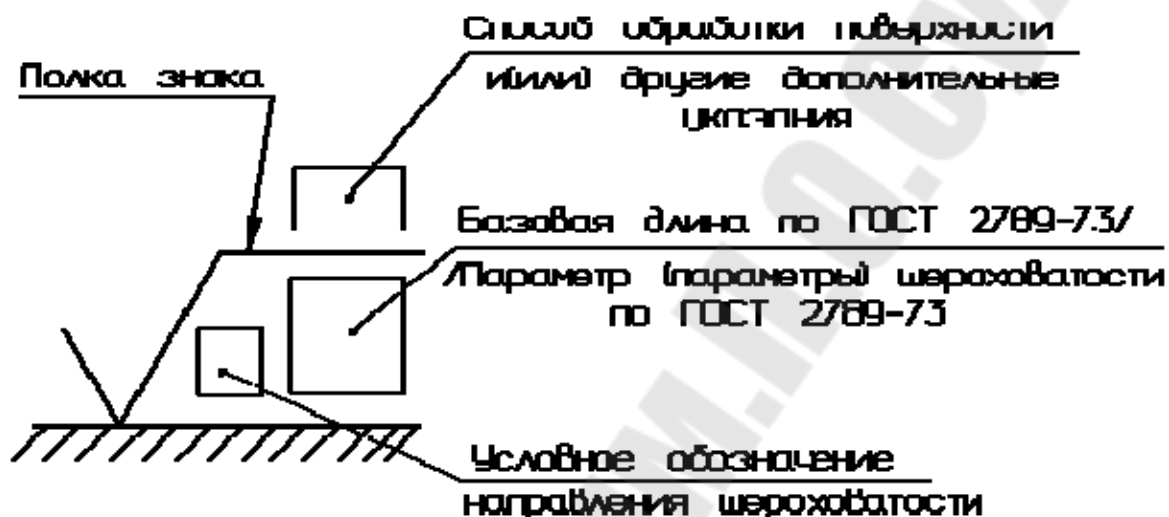


Рис. 2.3. Структура обозначения шероховатости поверхности

При применении знака без указания параметра и способа обработки его изображают без полки.

В обозначении шероховатости поверхности, способ обработки которой конструктором не регламентируется, применяют знаки в соответствии с рисунком 2.4 а. Для обозначения шероховатости поверхности, которая должна быть образована только удалением слоя материала, применяют знак изображенный на рисунке 2.4 б. Если поверхность должна быть образована без удаления слоя материала, для обозначения её шероховатости применяют знак изображенный на рисунке 2.4 в с указанием значения параметра шероховатости.

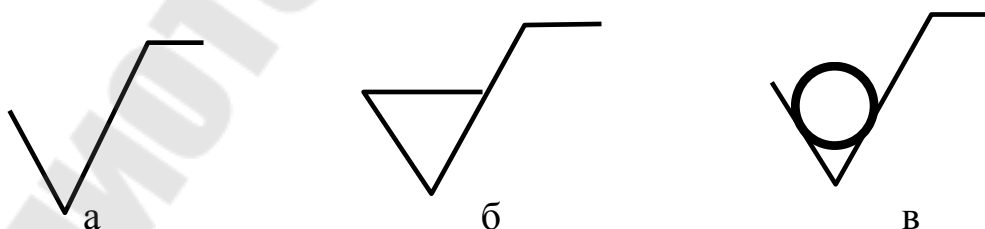


Рис. 2.4. Обозначение шероховатости поверхности для различных технологических требований к обработанной поверхности: а – без указания способа обработки; б – при обязательном удалении слоя

материала механическим путем; в – при образовании поверхности без удаления слоя материала механическим путем.

В зависимости от функционального назначения поверхности конструктор может применять все необходимые элементы в обозначении шероховатости поверхности, как показано на рисунке 2.5 а. Если же способ обработки поверхности и направление неровностей не оказывают существенного влияния на особенности последующей эксплуатации детали, то используется упрощенное обозначение, как показано на рисунке 2.5 б.

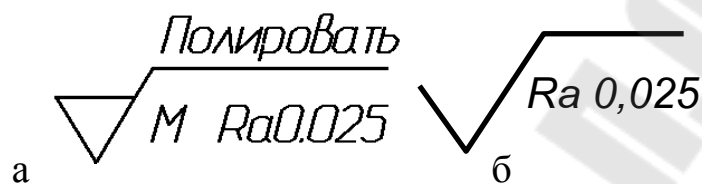


Рис. 2.5. Примеры полного (а) и упрощенного (б) обозначения шероховатости поверхностей

Обозначения шероховатости поверхностей на изображении детали располагают на линиях контура, выносных линиях или полках линий-выносок. При указании одинаковой шероховатости для всех поверхностей детали знак шероховатости помещают в правом верхнем углу чертежа и на изображение детали обозначение не наносят (рисунок 2.6 а). Если поверхности с одинаковыми шероховатостями образуют в плоскости чертежа изображение в виде замкнутого контура, то их общая шероховатость обозначается символом, указанным на рисунке 2.6 б.

В случае одинаковой шероховатости для преобладающей части поверхностей детали шероховатость наносится, как показано на рисунке 2.6 в. Это означает, что все поверхности, на которых нет обозначения шероховатости, имеют шероховатость с величиной микронеровностей, указанной в правом верхнем углу чертежа. Размеры знака в скобках должны быть одинаковыми со знаками на изображениях. Размеры и толщина линии знака, выносимого в правый верхний угол, должны быть в 1,5 раза больше, чем в обозначениях на изображении.

Шероховатость поверхностей, формируемая различными способами обработки, представлена на рисунке 2.7. Приведены наиболее часто встречающиеся элементы деталей и соединений, шероховатость которых формируется в зависимости от технологических возможностей способа обработки поверхности. Числовые диапазоны указаны для среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$ .

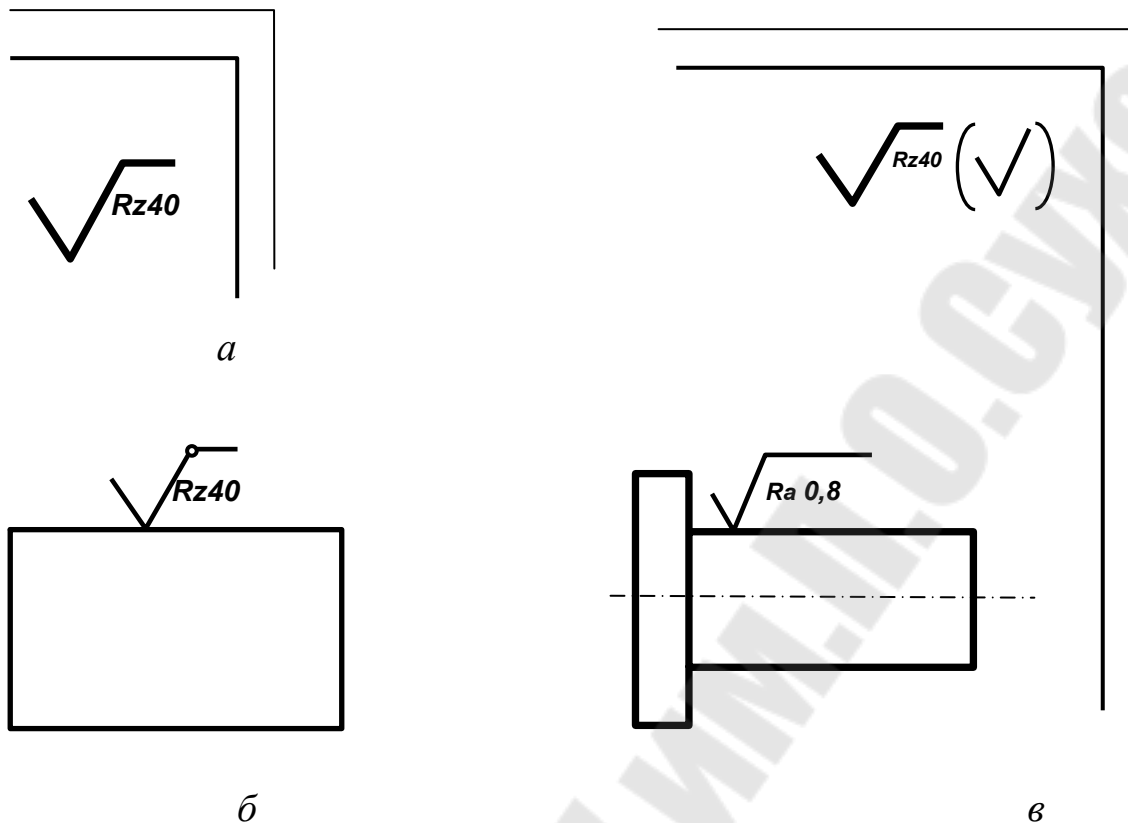


Рис. 2.6. Примеры обозначения шероховатости поверхности на чертежах деталей: а – расположение знака шероховатости регламентирующего шероховатость всех поверхностей детали конкретного чертежа; б – указание шероховатости одинаковой для всех поверхностей детали образующих замкнутый контур; в – пример указания шероховатости поверхности, отличающейся от шероховатости остальных поверхностей детали.

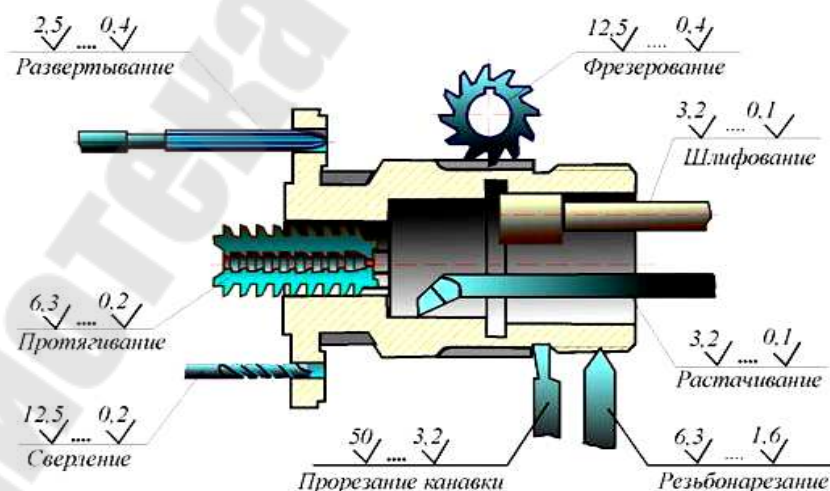


Рис. 2.7. Наиболее часто применяемые методы механической обработки деталей и шероховатость поверхности образованная данными методами.

## Вопросы для самопроверки

1. Что в технике называют шероховатостью поверхности?
2. Чем отличаются оценка шероховатости поверхности по критерию  $R_z$  и  $Ra$ ?
3. Как обозначают шероховатость поверхности на чертеже?
4. Назовите факторы, влияющие на размерную точность обрабатываемых поверхностей?
5. Назовите факторы, определяющие качество поверхностного слоя обработанных поверхностей деталей машин?

## Глава 3. ТЕХНОЛОГИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

### 3.1. Общая характеристика литейного производства

*Литейное производство* – это отрасль машиностроения, занимающаяся изготовлением деталей (обычно сложной конфигурации) и заготовок путем заливки расплавленного металла в форму, полость которой имеет заданные конфигурацию и размеры. Заготовку или изделие, получаемые методом литья, называют *отливкой*. Наружные очертания отливки образуются стенками полости формы, а внутренние полости, отверстия, пустоты, каналы и сложные поверхности образуются с помощью вставок в литейные формы, называемых стержнями. Изготовление форм и стержней в общей трудоемкости производства литых деталей составляет до 50 %.

Процесс литейного производства включает: изготовление моделей и стержневых ящиков, изготовление форм и стержней, плавление и доводку металла, сборку литейных форм и заполнение их металлом, выбивку, обрубку и очистку отливок, контроль качества отливок, исправление брака и окраску. Литая заготовка получается путем заливки расплавленного металла во внутреннюю полость литейной формы. В рабочую полость металл поступает через каналы литниковой системы. Затекание металла может происходить свободно - под действием его силы тяжести и принудительно - под избыточным давлением.

Литье – относительно дешевый способ изготовления деталей, более экономичный по сравнению с обработкой резанием с точки зрения рационального использования металла, выгодно отличающийся от обработки давлением возможностью получения изделий сложной конфигурации. Доля литых деталей в современном машиностроении составляет около 50 %, в станкостроении – до 80 % массы машин.

Первые литые изделия получали еще в III веке до новой эры, сначала из бронзы, позже из чугуна. Значительное развитие чугунное литье получило в XIII–XIV веках. Стальные отливки начали получать в XIX веке, отливки из алюминия и магния в прошлом веке. Масса деталей и отливок колеблется от нескольких граммов до нескольких сот тонн. Некоторые специальные виды литья позволяют получать отливки с высокой чистотой поверхности и точностью по размерам, что сокращает или исключает последующую механическую обработку.

Для изготовления отливок применяют множество способов литья: в песчаные формы, по выплавляемым моделям, в кокиль, под

давлением, центробежное литье и др. Область применения того или иного вида литья определяется объемами производства, точностью литья, качеством поверхности, экономическими факторами. Наиболее широко используется литье в песчаные формы.

Эффективность литейного производства заготовок можно охарактеризовать *коэффициентом использования металла* (КИМ), представляющим собой отношение массы готовой детали и заготовки (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Эффективность использования материала заготовки при различных методах формообразования изделий

Вид заготовки	КИМ	Вид заготовки	КИМ
Литье:			
под давлением	0,95	Профильный прокат	0,70
по выплавляемым моделям	0,90	Штамповка горячая	0,45
в оболочковые формы	0,80	Прутки	0,35
в кокиль	0,75	Ковка свободная	0,30
в песчаные формы	0,70		

Литейное производство объединяет в себе комплекс участков: модельный, смесеприготовительный, формосборочный, плавильный, выбивки отливок, обрубки, очистки отливок.

*Способы изготовления отливок* делятся на две группы: литье в песчаные формы и специальные способы литья. *Способы литья в песчаные формы* могут быть *ручными и машинными* (механизированными, автоматизированными). *Специальные способы литья* подразделяются на *литье в кокиль (металлические формы)*; *литье по выплавляемым, растворяемым, выжигаемым моделям*; *литье в оболочковые формы*; *литье под давлением*; *центробежное литье* и др.

### 3.2. Литейные свойства сплавов

*К литейным свойствам сплавов* относятся те свойства, по которым можно оценить возможность получения из них качественных отливок заданных геометрических размеров. К основным литейным свойствам относятся: *жидкотекучесть, усадка, склонность к образованию трещин, ликвация и газопоглощение.*

**Жидкотекучесть** характеризует способность металлов и сплавов в расплавленном состоянии заполнять полость стандартной формы (пробы) и точно воспроизводить очертания отливки. Она зависит от состава, физико-химических свойств сплавов, теплофизических свойств формы, технологических условий литья. Наибольшей жидкотекучестью обладают чистые металлы и эвтектические сплавы. Сплавы, имеющие структуру твердых растворов и с гетерогенными структурами, обладают меньшей жидкотекучестью. Увеличению жидкотекучести способствует повышение теплоемкости и удельной теплоты кристаллизации сплава. Существенное влияние оказывают также теплофизические свойства материала формы. Чем с большей скоростью материал формы поглощает теплоту расплавленного металла, тем быстрее остывает металл. Возрастает его вязкость и, соответственно, снижается жидкотекучесть. Поэтому одним из способов ее увеличения является подогрев металлических и керамических литейных форм.

Жидкотекучесть сплавов оценивается путем заливки специальных технологических проб. Широко используются спиральные технологические пробы по ГОСТу 16438-70, где ее определяют по длине спиралевидного прутка, образующегося при перемещении расплава по каналам этой пробы в песчаной или металлической форме.

Под **усадкой** понимается уменьшение объема или линейных размеров детали при затвердевании и охлаждении. Различают линейную  $\epsilon_{\text{лин}}$  и объемную  $\epsilon_v$  усадки:

$$\epsilon_{\text{лин}} = \frac{L_{\text{ф}} - L_{\text{отл}}}{L_{\text{отл}}} \cdot 100\%$$

$$\epsilon_v = \frac{V_{\text{ф}} - V_{\text{отл}}}{V_{\text{отл}}} \cdot 100\%,$$

где  $L_{\text{ф}}$ ,  $L_{\text{отл}}$ ,  $V_{\text{ф}}$ ,  $V_{\text{отл}}$  - линейные размеры и объемы формы и отливки, соответственно.

Проявлением объемной усадки является образование наружной усадки, усадочных раковин и пористости в отливках.

Различают свободную усадку и затрудненную. *Свободная усадка* обусловлена лишь свойствами сплава. *Затрудненная усадка* возникает в сложных по конфигурации отливках в результате совместного термического и механического торможения процессов изменения геометрических размеров при затвердевании.

На величину усадки оказывает влияние химический и фазовый состав сплава, величина температурного интервала кристаллизации



сплава, коэффициент термического расширения сплава, а также технологические условия литья. Перегрев сплава перед заливкой способствует увеличению объема усадочных раковин и образованию пористости. Увеличение скорости охлаждения расплава приводит к увеличению плотности отливки и объема усадочной раковины.

В отливках сложных конфигураций в связи с неравномерностью и неодновременностью усадки возникают остаточные внутренние напряжения, что может вызвать коробление отливок и даже образование в них трещин. Различают *горячие трещины*, возникающие в интервале температур затвердевания сплава, и *холодные*, возникающие в металле, охлажденном до комнатной температуры, вследствие высоких внутренних напряжений. У горячих трещин поверхность неровная, окисленная, а у холодных – гладкая, светлая (либо зернистая с цветами побежалости).

Линейную усадку определяют на образцах специальной формы путем замера линейных размеров проб после их охлаждения в форме до комнатной температуры. Величины усадки некоторых сплавов приведена в таблице 3.2

Таблица 3.2

Усадка некоторых сплавов

Сплав	Усадка, %	Сплав	Усадка, %
Серый чугун	1,1...1,3	Магниевые сплавы	1,0...1,6
Углеродистая сталь	1,2...2,4	Латуни	1,5...1,9
Легированная сталь	2,5...3,0	Оловянные бронзы	1,0...1,5
Силумины	1,0...1,5	Безоловянные бронзы	1,6...2,2

Под *ликвацией* понимается неравномерность химического состава сплава в различных частях отливки. Ликвация может быть как в микрообъемах сплава (внутри отдельных дендритов слитка) – дендритная, так и по отдельным его зонам – зональная ликвация. Одной из разновидностей зональной ликвации является ликвация по плотности (гравитационная). Дендритная ликвация устраняется путем диффузионного отжига. Гравитационную ликвацию подавляют перемешиванием расплавов, быстрым охлаждением, а также легирующим добавками.

### 3.3. Изготовление отливок в песчаных формах

Основные операции технологического процесса изготовления отливки могут быть разбиты на три группы: формовка, плавка и заливка; выбивка и очистка отливок. Процесс формовки включает операции изготовления модельного комплекта, приготовления формовочных и стержневых смесей, изготовление элементов формы и стержней, сборку литейной формы. В процессе плавки и заливки осуществляются операции подготовки и загрузки плавильной печи, плавления, доводки и заливки расплава в литейную форму. После затвердевания и охлаждения отливки выбивают из форм, очищают их от остатков формовочных и стержневых смесей, а также удаляют литники и прибыли отливок. Производят зачистку этих мест. При необходимости осуществляют термическую обработку отливок для снижения внутренних напряжений, получения требуемой структуры металла и механических свойств. Весь процесс изготовления отливки можно представить в виде следующей схемы (рис. 3.1.).

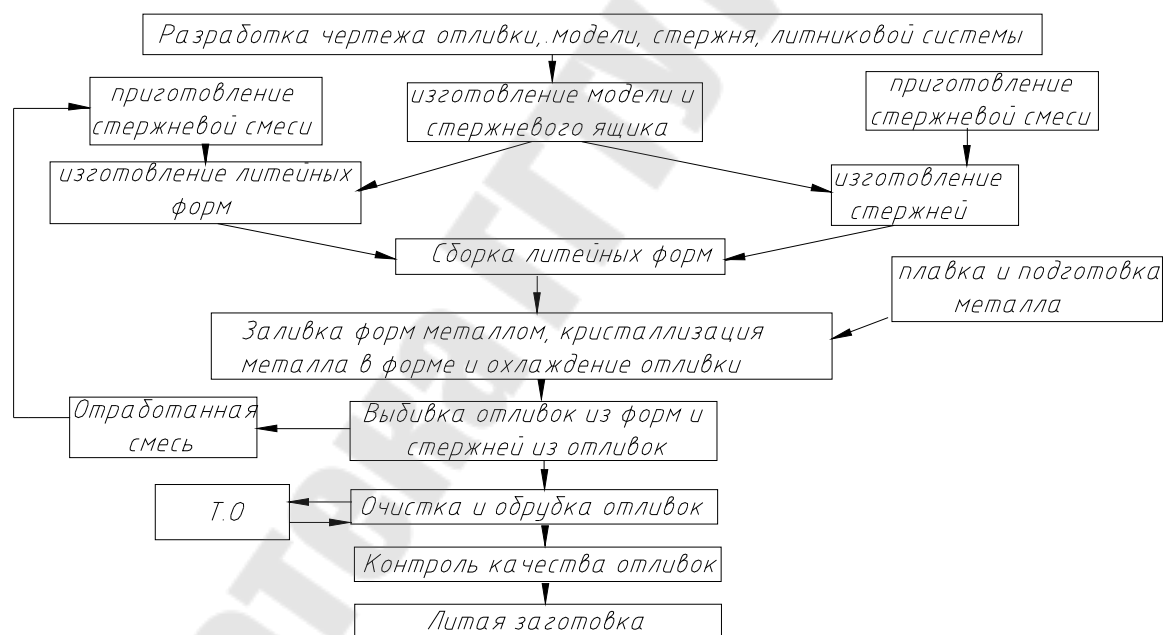


Рис. 3.1. Основные операции технологического процесса изготовления отливки

**Литейная форма** представляет собой конструкцию, состоящую из элементов, образующих рабочую полость, заполнение которой расплавом обеспечивает получение отливки заданных размеров и конфигурации. Обычно форма состоит из двух частей: верхней и

нижней. Песчаные формы являются разовыми. Литейные формы должны обладать следующими свойствами: прочностью (выдерживать давление расплава и образующихся газов), газопроницаемостью (пропускать газы, образующиеся в литейной форме), податливостью (деформироваться при усадке отливки), огнеупорностью (не оплавляться при контакте с жидким металлом) и др.

Комплект, приспособленный, используемый для изготовления отливки называется *литейной оснасткой*. Часть оснастки, необходимая для образования рабочей полости литейной формы при ее формовке, называется *модельным комплектом*. В модельный комплект входят: модели отливки и элементов литниковой системы, модельные и сушильные плиты, стержневые ящики, формирующие, контрольные и сборочные шаблоны для конкретных отливок. Понятие *формовочный комплект* включает в себя кроме модельного комплекта еще и необходимые для формовки опоки, наполнительные рамки, штыри, скобы и др.

*Модель* – это часть модельного комплекта, предназначенная для образования в литейной форме отпечатка, соответствующего наружной конфигурации и размерам отливки. Размеры модели делают больше, чем соответствующие размеры отливки на величину литейной усадки сплава (0,8...2 %). В местах отливки, подвергаемых механической обработке, делается припуск на обработку 0,7...5 мм в зависимости от размеров и сложности отливки. Модели изготавливают из древесины (для единичного производства), металлических сплавов и пластмасс. Модели могут быть разъемными и неразъемными. Для предотвращения смещения одной части модели относительно другой их соединяют между собой фиксаторами.

По сравнению с отливкой модель имеет выступающие части (стержневые знаки), формирующие углубления, для установки стержней, оформляющих внутренние полости в отливке.

*Стержень* является элементом литейной формы. Для изготовления стержней применяются специальные *стержневые ящики* из тех же материалов, что и модели. Они могут быть разъемными и неразъемными.

*Модельная плита* служит для формирования поверхности разреза литейной формы и несет на себе различные части модели, включая литниковую систему. *При машинной формовке используются металлические подмодельные плиты.*

Основные элементы литейной формы приведены на рис. 3.2.

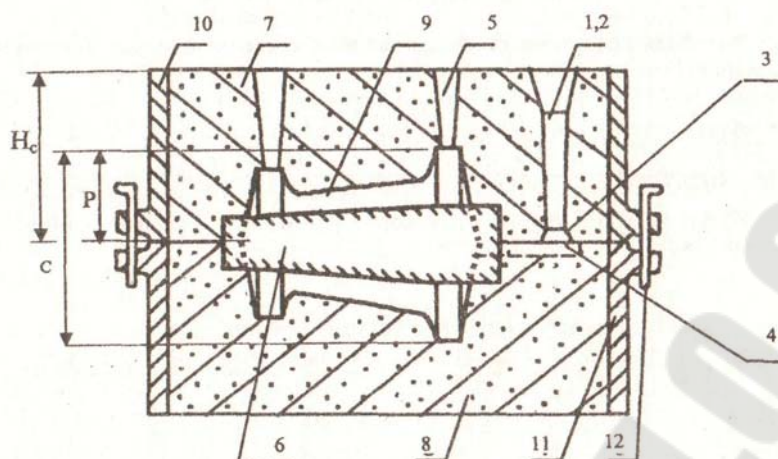


Рис. 3.2. Основные элементы литейной песчаной формы.

Для удержания формовочной смеси при изготовлении литейной формы, ее транспортировке и при заливке металлом используются **опоки**, представляющие собой сварные, литые или сборные жесткие рамы различной конфигурации. Обычно используют две опоки, верхнюю 10 и нижнюю 11.

**Литниковая система** литейной формы представляет собой систему каналов и элементов, обеспечивающих подвод расплавленного металла в рабочую полость формы, а также питания ее в процессе затвердевания. Литниковая система включает *литниковую чашу* (воронку) 1, предназначенную для облегчения заливки расплавленного металла из разливочного ковша, стояк 2, питатели 4, шлакоуловитель 3 и прибыль 5. *Стояк* предназначен для создания статического давления жидкого металла и передачи металла к другим элементам системы. Стояк имеет конусность 2...4 % для удобства формования и создания напора расплава. *Шлакоуловитель* (горизонтальный канал) служит для очистки металла от шлака и неметаллических примесей при передаче расплава в *питатели*, через которые металл поступает непосредственно в полость формы. Шлакоуловитель устанавливается в верхней полуформе, а питатели – в нижней. Для уменьшения гидростатического давления под стояком и предотвращения разрушения формы в месте стыка выполняется *зумпф* – углубление. К литниковой системе относятся также выпоры и прибыли. *Выпоры* и вентиляционные каналы обеспечивают отвод газов из расплавленного металла и всплывающих шлаков из полости формы. *Прибыли* компенсируют усадку отливки при кристаллизации и располагают их над массивными участками отливки. Прибыли заполняются жидким металлом при

заливке формы. В процессе охлаждения отливки расплав из полости прибыли втягивается в рабочую полость формы, компенсируя усадку. За счет питания рабочей полости металлом из прибыли, усадочная раковина формируется не в теле отливки, а в объеме металла, затвердевающим в полости прибыли. Внутреннее отверстие в детали формуется с помощью стержня 6.

Изготовление формы тем или иным методом называется **формовкой**. Для формовки необходимо иметь литейную технологическую оснастку, стержневой ящик, опоки, модельные плиты, а также формовочные и стержневые смеси.

Формы и стержни изготавливают, соответственно, из формовочных и стержневых смесей, которые должны обладать высокой *огнеупорностью* – способностью не размягчаться и не плавиться при воздействии жидкого металла; хорошей *пластичностью* (для получения отчетливого отпечатка); высокой *газопроницаемостью* (для предотвращения газовых раковин); механической прочностью (до 16 кПа для форм и до 200 кПа для стержней) и *противопригарностью* – не спекаться и не сплавляться с расплавленным металлом. Для стержневых смесей требуется еще их податливость – способность изменять свои размеры под действием усадки отливки.

**Формовочные смеси** включают три группы составляющих: огнеупорную основу, связующие материалы, специальные добавки. В качестве огнеупорной основы широко используется кварцевый песок. Применяют также магнезит, шамот и др. огнеупорные материалы. Связующие материалы служат для связывания между собой частиц огнеупорной основы, обеспечивая необходимую прочность смеси. Чаще всего применяют глину. Используется также жидкое стекло, синтетические смолы, отходы сахарного производства и др. Специальные добавки вводят для улучшения технологических свойств, таких как податливость, газопроницаемость и др. (древесные опилки, каменноугольную пыль и др.).

По характеру использования смеси подразделяются на облицовочные, наполнительные и единые. При изготовлении формы из одной формовочной смеси ее называют *единой*. Применяются они при серийном и массовом производстве с использованием машинной формовки.

*Облицовочные смеси* применяют для создания слоя толщиной 40...100мм непосредственно контактирующего с жидким металлом.

Эти смеси приготавливаются с большим содержанием свежих исходных материалов.

*Наполнительные смеси* используются для заполнения остального объема формы и в своем составе содержат значительное количество отработанных смесей, бывших в употреблении. Изготовление форм с двумя типами формовочных смесей трудоемко и используют этот способ для производства крупных и сложных отливок.

К *стержневым смесям* предъявляются более высокие требования по огнеупорности, поверхностной твердости, податливости, газопроницаемости, гигроскопичности, выбиваемости, чем к формовочным смесям, так как стержни находятся внутри расплавленного металла и испытывают с его стороны тепловые и механические воздействия. Для их изготовления применяют песчано-жидкостекольные смеси, холодноотверждающиеся на основе синтетических смол, песчано-глинистые и др.

Связующие на основе смол отверждают посредством добавления отвердителей и катализаторов. Жидкостекольные связующие отверждают двухкальциевым силикатом ( $2CaO \cdot SiO_2$ ), вводимым в смесь при ее изготовлении. Смеси горячего отверждения изготавливают с использованием термореактивных смол и песчано-глинистых смесей, способных быстро и необратимо твердеть при контакте с нагретой до температуры оплавления смолы оснастки.

Для предотвращения пригара формовочной смеси к металлу и повышения чистоты поверхности отливки на поверхности форм и стержней наносят тонким слоем *противопригарные припылы и краски*. В качестве *припылов* применяют порошкообразные оксиды магния, древесного угля и бентонита, графита, пылевидного кварца и др. *Противопригарные краски* изготавливают из этих же компонентов с добавлением связующего.

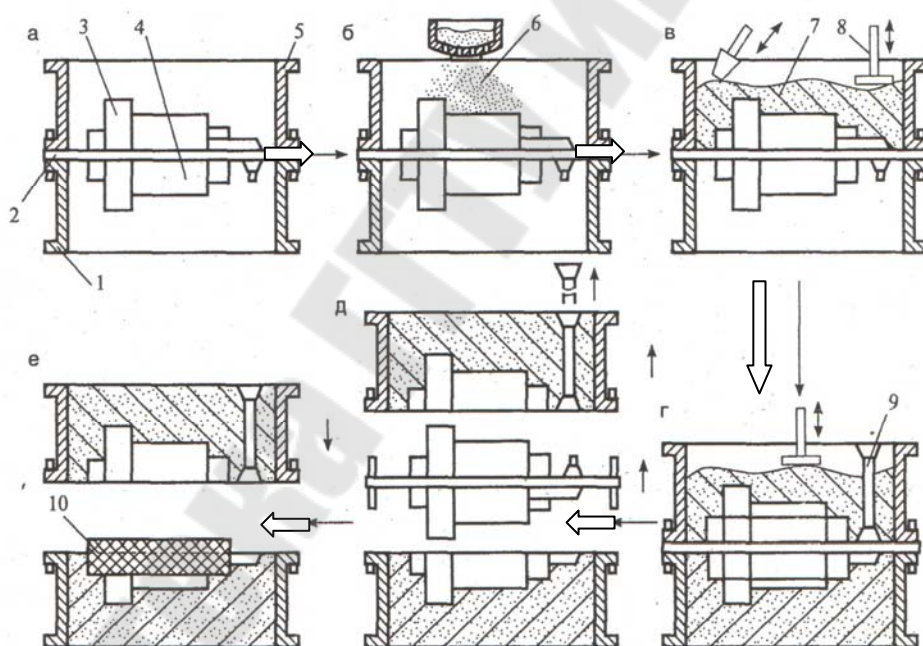
Снижению усадки и пористости, а также предотвращению искажения геометрической формы отливок и образованию трещин при кристаллизации и охлаждении отливок, имеющих местное утолщение, способствует использование внутренних и внешних *холодильников*, а также использование *прибылей*.

### **Изготовление песчаных форм ручной формовкой**

Для получения отливки в песчаных формах изготавливают ее деревянную модель, а затем литейную форму. Для чего на модельную плиту устанавливают половину модели 3, питатели и зумпф, ставят



опоку 5, припыливают модель разделительным покрытием 6 и засыпают формовочную смесь 7 (рис.3.3). Уплотняют ее 8 и делают газоотводящие каналы путем наколов иглой. Опоку переворачивают на 180 градусов. Устанавливают на плиту вторую половину модели с остальными элементами литниковой системы 9 и вторую опоку, повторяют формовочные операции. Переворачивают опоку на 180 градусов. Формуют стержневые знаки и сушат их при необходимости. Затем полуформы снимают с модельной плиты. Устанавливают стержни 10 в нижнюю полуформу, обдувают формирующие поверхности воздухом и накрывают второй полуформой. Далее через литниковую систему заливают жидкий металл. При изготовлении крупногабаритных толстостенных отливок для снижения усадки и внутренних напряжений используют холодильники, представляющие собой металлические вставки, углубленные в соответствующие массивные места полуформ (рис. 3.4.).



*Рис. 3.3.* Технология изготовления песчаной формы вручную:  
 а – установка опок; б – нанесение разделительного покрытия; в – набивка нижней полуформы; г – набивка верхней полуформы; д – удаление модели; е – сборка формы

Заливка форм производится из ковша. Температура заливки стали составляет 1500...1600 °С, белого чугуна – 1380...1450 °С, серого чугуна – 1260...1400 °С, бронзы – 1100...1150 °С, алюминиевых сплавов – 700...780 °С, магниевых сплавов - 680...780 °С.

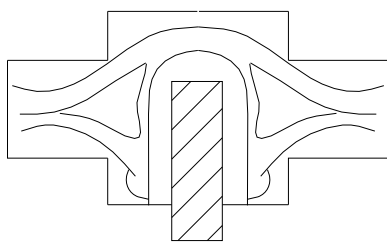


Рис. 3.4. Схема применения внутреннего холодильника

### Машинная формовка

Современные литейные цеха осуществляют машинную формовку, в которой механизирован процесс установки опок на машину, засыпка формовочной смеси в опоку, уплотнение смеси, удаление моделей из формы, транспортирования и сборки форм. Уплотнение формовочной смеси осуществляется прессованием, встряхиванием, пескометом, вакуумной формовкой и др.

**Уплотнение прессованием** выполняется на специальных формовочных машинах с верхним или нижним вариантами уплотнения (рис. 3.5 а). При нижнем прессовании уплотнение осуществляется за счет вертикального перемещения стола с полуформой, установленной на модельной плите, навстречу неподвижной прессовой колодке.

При верхнем прессовании модельная плита с полуформой, установленная на столе пресса, остается неподвижной. Уплотнение формовочной смеси производится при вертикальном движении ползуна пресса при подаче сжатого воздуха под давлением 0,5...0,8 МПа в нижнюю часть цилиндра. Для равномерности уплотнения применяют прессовые колодки, повторяющие профиль модели. Метод прост, од-

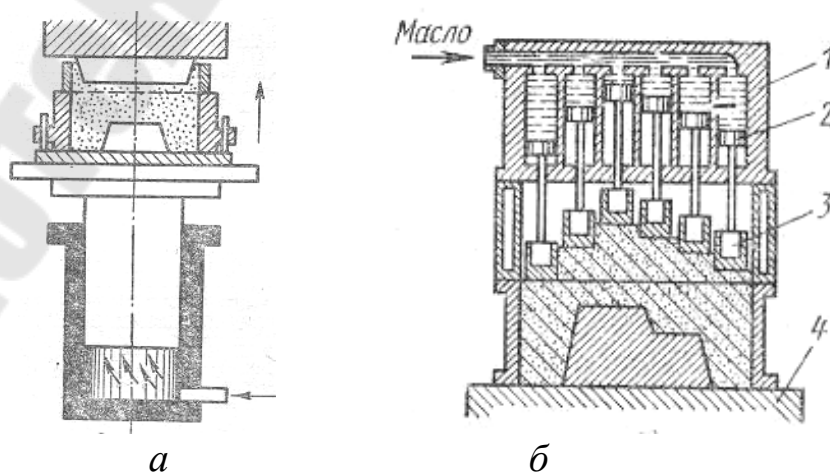


Рис. 3.5. Схемы уплотнения: а – нижним прессованием, б - многоплунжерной колодкой



нако уплотнение неоднородно по высоте формы, что особенно важно при получении сложных отливок. Используется метод для уплотнения формовочной смеси в опоках высотой до 200...250 мм.

**Уплотнение многоплунжерной прессовой головкой**, состоящей из нескольких десятков независимых друг от друга плунжеров 3, работающих под давлением масла или воздуха, обеспечивает равномерное уплотнение по всему объему формы, т.к. прессовая головка выполнена по схеме сообщающихся сосудов, что обеспечивает одинаковое давление на каждый плунжер (рис. 3.5 б).

При **уплотнении встряхиванием** (рис.3.6) модельная плита 3 с моделью, опокой 4 и наполнительной рамкой устанавливается на столе 2 формовочной машины. В опоку засыпается формовочная смесь. Под поршень пресса подается воздух под давлением 0,5...0,6 МПа. Стол поднимается до тех пор пока не откроется выпускное отверстие, через которое воздух уходит в атмосферу. Стол падает вниз, ударяясь об опорную поверхность цилиндра. Смесь при этом уплотняется за счет действия инерционных сил. Уплотнение встряхиванием обеспечивает более равномерное уплотнение формовочной смеси, хотя производительность ниже, чем при прессовании. Для качественного уплотнения необходимо 25...50 ударов.

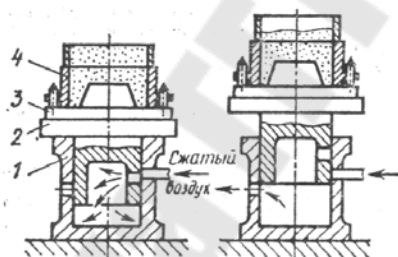


Рис. 3.6. Схема уплотнения встряхиванием

**Уплотнение пескометом** (рис. 3.7) используется при производстве крупных отливок. Формовочная смесь транспортером 1 подается на быстровращающийся ротор 6 с ковшами 2. Ковши захватывают смесь и бросают ее в опоку 9, установленную на модельной плите. Модельная плита с моделью перемещается под пескометной головкой 1, что позволяет равномерно заполнять всю полуформу, обеспечивая практически равномерную плотность формовочной смеси во всем объеме формы. Производительность машин до 50м<sup>3</sup>/ч уплотненной формовочной смеси.

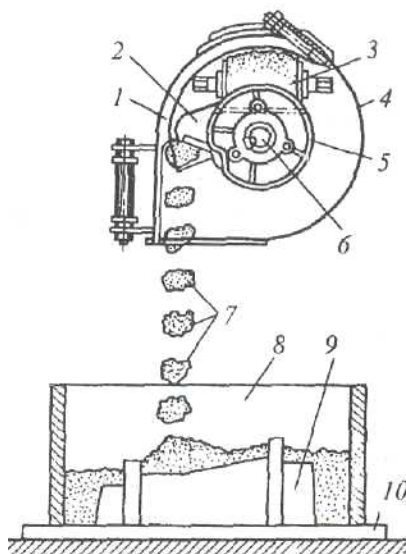


Рис. 3.7. Схема пескометного уплотнения

**Пленочно-вакуумная формовка** осуществляется в опоках, оборудованных вакуумными камерами, сухим песком без связующего с использованием постоянных моделей за счет разности давлений с внешней стороны формы и внутри между частицами песка. Песок удерживается в опоке с помощью полимерных пленок. Модель, имеющая специальные каналы для создания вакуума снаружи, устанавливается на модельную плиту, оборудованную вакуумирующей системой. Модель покрывается подогретой до термопластичного состояния полимерной пленкой и вакуумируется, благодаря чему она плотно облегает модель. Устанавливают на модельную плиту опоку, также оборудованную вакуумной камерой, создающей вакуум внутри опоки. В опоку засыпается сухой просеянный песок, опока покрывается полимерной пленкой и вакуумируется. После отключения вакуумной системы от модельной плиты, не отключая ее от опоки, извлекают модель. Аналогичным образом изготавливают вторую половину формы. Не отключая вакуумной системы от опок, собирают форму (если надо устанавливают стержни) и заливают форму металлом. После кристаллизации вакуумная система отключается и отливка вместе с песком выпадает из опок. Метод прост и обеспечивает высокое качество поверхности отливки.

Для изготовления мелких отливок из серого, ковкого и высокопрочного чугунов, а также из стали в серийном и массовом производствах используют автоматическую безопочную формовку на высокопроизводительных пескодувно-прессовых автоматических линиях. В

качестве формовочных смесей используют холодно-твердеющие смеси с органическим связующим.

### **Изготовление стержней**

Стержни в литейных формах применяются для получения отверстий, полостей, а также сложных внешних очертаний отливок. Изготавливают их в стержневых ящиках. Технология изготовления зависит от сложности геометрической формы стержня и вида связующего стержневой смеси. Применяют ручную и машинную формовку.

В общем виде последовательность операций может быть следующей. Сначала стержневой ящик частично наполняют стержневой смесью, слегка уплотняют, устанавливают металлическую арматуру – каркасы (для придания необходимой жесткости и прочности), снова ящик заполняют стержневой смесью и уплотняют до полного заполнения объема ящика. После удаления излишков смеси для улучшения вентиляции стержень прокалывают душником. Дальнейшие операции зависят от типа связующего.

Стержни на песчано-глинистой основе или с масляным связующим подвергают сушке. Если в качестве связующего использовано жидкое стекло, их подвергают продувке углекислотой, в результате чего происходит упрочнение и отпадает необходимость в сушке. При использовании самоотверждающихся стержневых смесей их выдерживают необходимое время в ящике и дополнительной сушки не производят. Последние позволяют получать более точные отливки с меньшими припусками на обработку.

Большую часть стержней производят машинным способом на аналогичном оборудовании как и формы, только вместо подмодельных плит и опок устанавливаются стержневые ящики. Есть также специализированные мундштучные, пескодувные и пескострельные машины.

### **Окраска и сборка форм**

Для уменьшения физико-химического взаимодействия элементов формы с расплавленным металлом в процессе заливки и отверждения, предотвращения размыва движущимся металлом поверхностей и образования на поверхностях отливки пригаров, рабочие поверхности формы и стержней покрывают огнеупорными красками. При использовании водорастворимых красок необходима дополнительная сушка.

Перед сборкой полуформы и стержни проверяют на отсутствие повреждений поверхностей. Производится обдувка элементов воздухом с целью очистки от мусора, установка стержней и верхней полуформы на нижнюю, скрепление двух полуформ для предотвращения их открытия во время заливки. Для исключения смещения опок и обеспечения точности их установки предусматриваются специальные штифты и втулки на опоках и модельных плитах.

### **Заливка литейных форм**

Для получения сплавов в литейных цехах применяют различные типы электрических плавильных печей и вагранки. Электрические печи аналогичны печам, используемым в металлургии – дуговые, индукционные, сопротивления, электронно-лучевые.

Заливка расплава металла в литейные формы осуществляется из специальных ковшей разнообразных конструкций: чайниковые, стопорные, барабанные (часто используются чайниковые ковши). Температура заливаемого металла должна быть на 50...100 °С выше температуры ликвидус сплава. Заливка должна быть непрерывной до полного заполнения формы.

### **Охлаждение отливок, выбивка и очистка**

Продолжительность процесса охлаждения отливок зависит от их массы, состава сплава, свойств формовочных смесей и может составлять от нескольких минут до нескольких суток. После завершения кристаллизации отливки извлекают из формы и в дальнейшем они охлаждаются на воздухе. Тонкостенные отливки во избежание растрескивания охлаждают несколько минут, затем выбивают и окончательное охлаждение производят на воздухе. Массивные многотонные отливки могут охлаждаться в форме по несколько суток для получения более равномерной структуры металла.

Извлечение отливок из разовых форм при единичном мелком производстве осуществляют вручную, а при серийном производстве и при изготовлении больших отливок – механизированным или автоматизированным путем на вибростолах и виброконвейерах. Стержни из крупных отливок удаляют сильной струей воды под давлением 10 МПа.

Извлеченная из формы отливка подлежит обрубке и очистке. Обрубка состоит в отделении от отливки литниковой системы, прибылей, выпоров, заусенцев (по плоскости разъема форм и у стержневых знаков). Обрубка осуществляется с помощью дисковых и ленточ-

ных пил, пневматических зубил, электродуговой и газовой резкой, на специальных прессах и другими методами.

Очистка отливок от остатков формовочных смесей с наружных и внутренних поверхностей отливки производится на выбивных решетках (совместно с выбивкой), в гидropескоструйных установках струей воды с песком под давлением до 3 МПа, в дробеметных (дробеструйных) барабанах и камерах струей чугуновой или стальной дроби, специальных очистных галтовочных барабанах. Для снижения внутренних напряжения отливки могут подвергаться отжигу.

### **3.4. Специальные способы литья**

В связи с тем, что песчаные формы разовые и разрушаются после изготовления каждой отливки, а также обеспечивают низкое качество поверхности получаемых отливок, в серийном производстве широко используются специальные виды литья: в оболочковые формы, по выплавляемым и выжигаемым моделям, кокильное, под давлением, центробежное и др. Эти методы позволяют получать отливки повышенной точности, с малой шероховатостью поверхности, минимальными допусками на механическую обработку.

#### **3.4.1. Литье в оболочковые формы**

Литье в оболочковые формы - это способ получения отливок свободной заливкой расплава в литейную форму, представляющую собой оболочку толщиной 8...15 мм, изготовленную из огнеупорного материала на основе термореактивного полимерного связующего. По сравнению с отливками в песчаные формы допуск на механическую обработку назначается в полтора раза меньший, т.к. выше точность изготовления отливки и качество поверхности (до 5-6 класса). Этим методом получают отливки средней массы 5...15 кг, иногда до 100 кг, практически из любых сплавов.

В качестве *огнеупорной основы* широко используется кварцевый песок, применяется также корунд, электрокорунд, циркон. В качестве *связующего* в основном используют фенолформальдегидную смолу с температурой плавления 100...120 °С, которая при нагреве переходит в вязко-текучее состояние и обволакивает зерна песка тонкой пленкой. При температуре 200...250 °С происходит сшивка молекул связующего и затвердевание смеси. Кроме того в смесь вводят раствори-

тели и смазывающие материалы, предотвращающие пригорание смеси к модельной оснастке и др.

Оболочковые формы получают с помощью нагретых металлических моделей, изготавливаемых из серого чугуна, стали или алюминиевых сплавов. Форму изготавливают из двух половин, соединяемых посредством клея или механическим путем. Толщина оболочек для изготовления мелких и средних отливок составляет 8...10 мм, для крупных – 12...15 мм.

Изготавливают оболочковые формы бункерным, пескодувным и другими методами. При бункерном способе в поворотный вокруг горизонтальной оси бункер 2 засыпают формовочную смесь 3 и на верхней опорной поверхности бункера закрепляют нагретую до 200...270 °С модельную металлическую плиту с моделью 1, покрытую разделительным слоем на силиконовой основе, предотвращающим прилипание к оснастке формовочной смеси (рис. 3.8а). Бункер поворачивают на 180 градусов и смесь падает на модельную плиту, покрывая всю рабочую поверхность (рис.3.8б). Смола плавится и затвердевает, образуя твердую оболочку 4. Для формирования оболочки толщиной 5...15 мм делается выдержка 15-20 с. Бункер возвращают в исходное положение. Неоплавившаяся смесь сыпается в бункер. Модельную плиту с образовавшейся оболочкой 5 снимают с бункера и помещают в печь с температурой 300...350 °С для окончательного отверждения на 1...3 мин. Готовую оболочковую полуформу снимают с модели с помощью толкателей. По этой же технологии изготавливают и вторую полуформу, а также стержни, которые могут быть сплошными и полыми. Полые имеют на 40...80 % меньше массу, чем сплошные, и легче выбиваются из отливок. Соединение полуформ производят путем склеивания или скобами, используя замковое соединение «выступ-впадина». Литниковая система формируется при изготовлении оболочек.

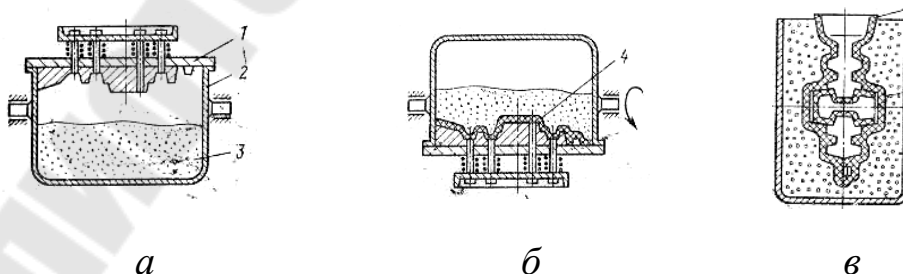


Рис. 3.8. Схема получения оболочковой формы

Собранные формы помещают в металлический контейнер и засыпают чугуной дробью (малых форм – песком) для предотвращения коробления и разрушения форм при заливке их расплавом (рис. 3.8в). После затвердевания отливок оболочковые формы и стержни легко разрушаются

Метод литья в оболочковые формы позволяет изготавливать тонкостенные детали с толщиной стенок 3...15 мм сложной конфигурации с гладкой и чистой поверхностью, с небольшими допусками на механическую обработку.

Недостатком метода является высокая стоимость формовочных смесей (однако их расход в 10...12 раз меньше, чем при литье в песчаные формы), ограничение в размерах отливок (до 1500 мм), выделение вредных летучих продуктов при изготовлении формы.

### **3.4.2. Литье по выплавляемым моделям**

Литье в формы, полученные по выплавляемым моделям, с давних пор применяли для получения литых скульптур, украшений и т.д. *Сущность метода* заключается в том, что детали получают заливкой в неразъемные керамические формы, изготовленные с помощью моделей из легкоплавящихся, выжигаемых или растворимых составов. Метод позволяет получать изделия сложной конфигурации, тонкостенные, с малой шероховатостью поверхности, минимальным припуском на механическую обработку, с уменьшенным расходом формовочных материалов. Однако процесс изготовления формы более трудоемкий. Метод широко используется для изготовления деталей из жаропрочных и труднообрабатываемых сплавов.

Разовые выплавляемые модели 3 изготавливают в прессформах 1 (рис. 3.9) из модельных составов 2, состоящих из двух и более легкоплавких компонентов (воск, парафин, стеарин и др.). Модели собирают в модельные блоки с общей литниковой системой 4. В один блок можно соединить до 100 моделей. Выплавляемые составы подразделяются на легкоплавкие, с температурой плавления 50...90 °С, и тугоплавкие, плавящиеся при температуре 90...340 °С. Легкоплавкие составы изготавливают в основном на основе парафина со стеарином или церезином. Они обладают хорошей жидкотекучестью, но невысокой прочно-

стью. В тугоплавких составах в качестве основы используют канифоль, карбамид и др. Тугоплавкие составы имеют меньшую жидкотекучесть, но более высокую прочность, обеспечивают отливке повышенную чистоту поверхности и точность размеров.

Водорастворимые составы получают на основе мочевины (карбамида), азотнокислых и др. водорастворимых солей. Эти составы обычно имеют малую усадку. Плавятся они при температурах 130...340 °С и широко используется при изготовлении сложных по форме стержней.

Керамическая суспензия приготавливается из огнеупорных материалов (пылевидный кварц, электрокорунд и др.) со связующим – гидролизированным раствором этилсиликата.

Формы по выплавляемым моделям изготавливают погружением модельного блока в керамическую суспензию 6 с последующей обсыпкой кварцевым песком 7 и сушкой 8 в течение 2...2,5 часов на воздухе или 20...40 минут в среде аммиака. Наносится таких 4...6 слоев.

Модели из форм удаляют выплавлением в горячей воде или растворением 9. Полученные оболочки 10 помещают в жаростойкие опоки 11, засыпают кварцевым песком 12, уплотняют и прокаливают при температуре 900...950 °С в течение 2 часов для спекания частичек огнеупорного материала и связующего 13. После этого в форму, обычно подогретую, заливают жидкий металл 14. Температура формы выбирается в зависимости от заливаемого металла: для сталей 800...900 °С, сплавов цветных металлов 600...700 °С, сплавов на основе алюминия и магния 200...250 °С.

Способом литья по выплавляемым моделям изготавливают сложные отливки с высоким качеством поверхности, например, турбинные лопатки из жаропрочных сплавов, художественное и ювелирное литье и др. К недостаткам способа следует отнести многооперационность и большую трудоемкость процесса изготовления формы, а также многообразие используемых материалов.



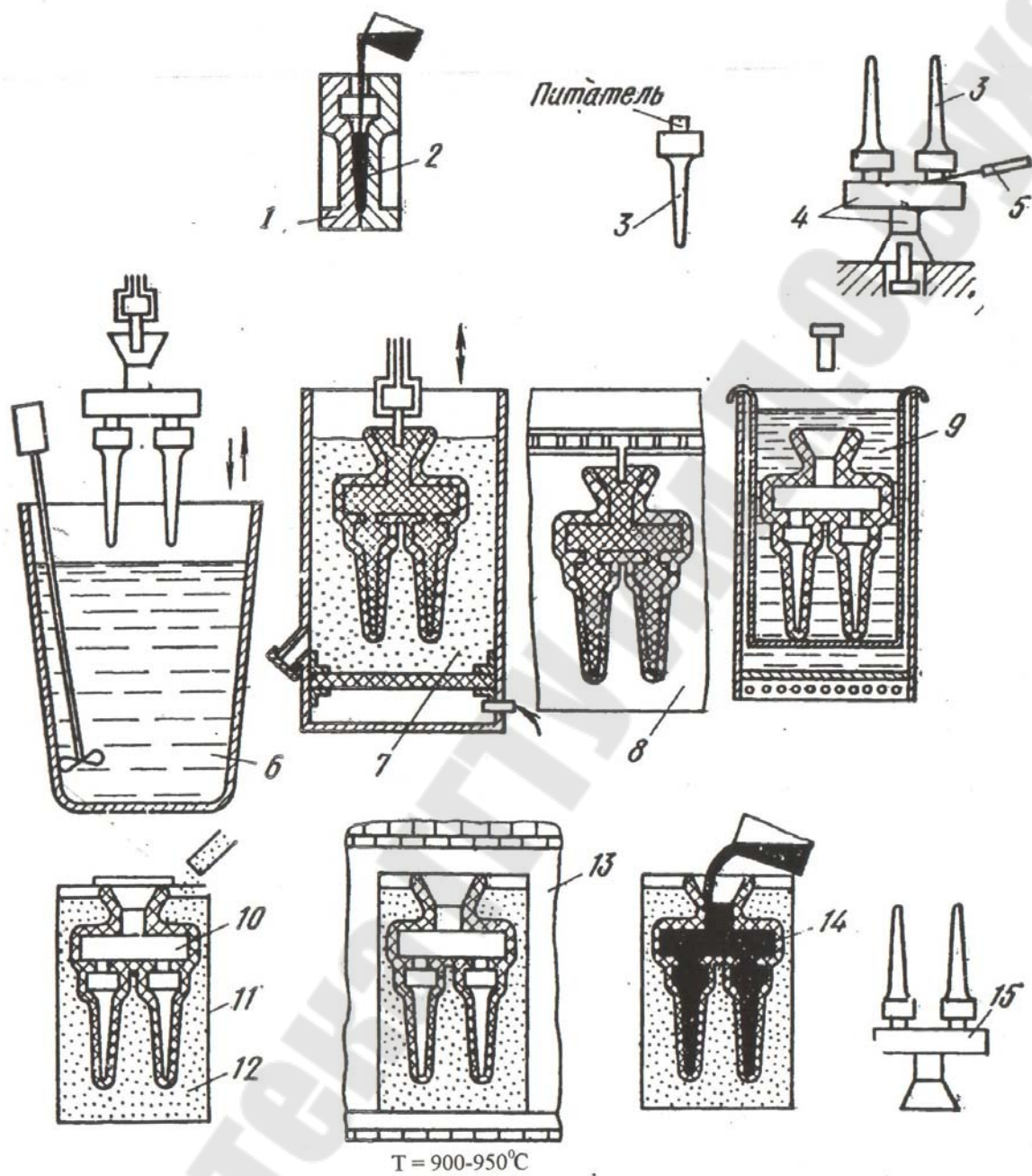


Рис. 3.9. Схема последовательности операций изготовления формы для литья по выплавляемым моделям

## Литье в постоянные формы

### 3.4.3. Литье в кокиль

При литье в кокиль отливки получают путем заливки расплава металла в металлические формы – *кокили*. В отличие от песчаных разовых форм, которые разрушаются после каждой отливки, кокили используют многократно (до сотен раз). Высокая прочность кокиля позволяет получать изделия с точными размерами, хорошим качеством поверхности (шероховатость не превышает  $R_z40$ ), меньшими припусками на механическую обработку, чем при литье в песчаные формы. Кокильное литье применяется для серийного и массового производства отливок массой до 2 тонн из алюминиевых и магниевых сплавов, чугуна, стали и др. сплавов. Метод хорошо поддается механизации и автоматизации. К недостаткам метода относится высокая стоимость изготовления кокилей и невысокая их стойкость, трудоемкость изготовления сложных по форме отливок.

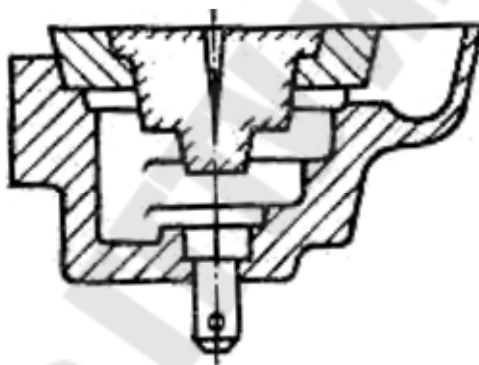


Рис. 3.10. Схема конструкции вытряхного кокиля

По конструкции различают *кокили вытряхные* (рис. 3.10), а также с *вертикальными и горизонтальными плоскостями разреза*. Полости в отливках изготавливаются песчаными, оболочковыми или металлическими стержнями. Полости сложной формы получают с применением разъемных или одноразовых стержней. Чтобы предотвратить поверхности кокилей от воздействия жидкого металла, на рабочую поверхность формы и металлических стержней наносят огнеупорный слой толщиной 0,5...1 мм из пылевидного кварца, молотого шамота, графита, мела и др. и связующего жидкого стекла. Покрyтия наносятся пульверизатором на предварительно подогретую до температуры 140...180 °С поверхность обычно 1 раз в смену.

Заливку металла производят в предварительно нагретый до температуры 150...350 °С кокиль, в зависимости от заливаемого сплава и

толщины стенок. Для чугунных отливок с толщиной стенок 5...10 мм производят нагрев до 300...350 °С, при толщине стенок 10...20 мм – до 150...200 °С. При изготовлении отливок из сплавов на основе алюминия и магния кокили нагревают до 250...350 °С, для сложных алюминиевых отливок 400...500 °С. Удаление газов из рабочей полости кокиля осуществляется по разъему формы. В плоскости разъема для этих целей делаются специальные каналы глубиной 0,2...0,5 мм. Отливки сложной формы извлекают из формы с помощью выталкивателей. Закристаллизовавшуюся отливку выталкивают из кокиля тогда, когда ее температура еще довольно высока, порядка  $(0,6...0,7)T_{кр}$ . Затем удаляют литниковую систему и в случае необходимости проводят термическую обработку отливки.

Разновидностью кокильного литья является *литье в облицованный кокиль*. Сам кокиль изготавливается из стали или чугуна путем отливки в разовую форму. Рабочая полость кокиля затем облицовывается слоем лакировочной смеси, отверждающейся при нагреве. При контакте расплава металла с облицовочным покрытием, обладающим меньшей теплопроводностью чем у металла, снижается скорость теплоотвода и кристаллизации, что позволяет избежать «отбела» при изготовлении тонкостенных отливок из чугуна. Облицованный кокиль имеет большую долговечность чем окрашенный. Кроме того изменяя толщину покрытия в отдельных местах полости формы, можно регулировать скорость охлаждения в различных участках отливки.

#### 3.4.4. Литье под давлением

*Сущность способа* состоит в том, что расплавленный металл в металлическую пресс-форму подают под избыточным давлением. Это улучшает заполняемость формы, позволяет получать отливки сложной конфигурации с толщиной стенок 1...3 мм с высоким качеством поверхности и точности размеров. Вследствие быстрого охлаждения сплава в металлической форме под избыточным давлением, металла отливки отличается мелкозернистой структурой и повышенной плотностью. Этим способом отливают мелкие тонкостенные детали из сплавов на основе алюминия, магния, меди, а также из стали. В большинстве случаев отливки не требуют дополнительной механической обработки, в том числе при изготовлении некоторых деталей с резьбой.

Для литья под давлением используются специальные машины с холодной или горячей камерой прессования. **На машинах с горизонтальной холодной камерой прессования** (рисунок 3.11 а) металл заливают в камеру прессования 4, из которой он плунжером 5 создающим давление 40...100 МПа подается в полость пресс-формы, состоящей из подвижной 1 и неподвижной 3 полуформ. В камеру заливают порцию металла по объему равную объему отливки и литниковой системы. После затвердевания отливки из пресс-формы удаляют толкателями. Камера контактирует с расплавом только в момент заполнения пресс-формы. Перед заливкой форму нагревают до 120...320°С. После извлечения отливки из пресс-формы, рабочую поверхность формы обдувают воздухом и смазывают антипригарными материалами для предупреждения приваривания отливки. Такие машины применяют для отливок из медных, алюминиевых, магниевых и цинковых сплавов массой до 45 кг.

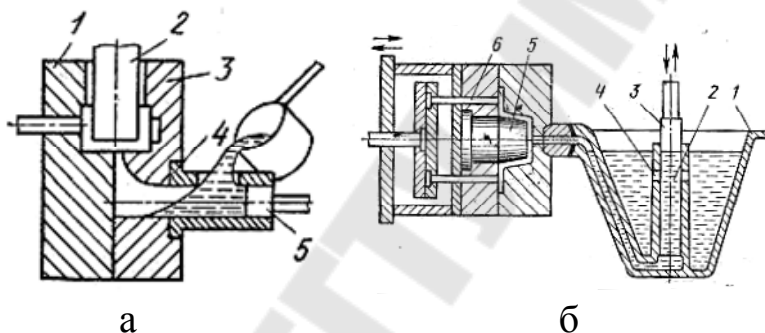


Рис. 3.11. Схемы изготовления отливок литьем под давлением:  
а – с холодной горизонтальной камерой прессования;  
б – с горячей камерой прессования

**На машинах с горячей камерой прессования** (рис. 3.11, б) камера прессования 2 расположена в обогреваемом тигле 1 с расплавленным металлом. При верхнем положении плунжера 3 расплавленный металл заполняет камеру прессования. При движении его вниз питающие отверстия 4 перекрываются, сплав под давлением 10...30 МПа заполняет полость пресс-формы 5. После затвердевания отливки плунжер возвращается в исходное положение. Отливка извлекается из пресс-формы посредством выталкивателей 6. Эти машины применяют для отливки деталей из цинковых и магниевых сплавов с температурой плавления до 480 °С, массой до 25 кг.

Недостатком способа литья под давлением является высокая стоимость пресс-форм и оборудования, ограниченность габаритных размеров и массы отливаемых деталей, возможность образования по-

ристости вследствие высокой скорости охлаждения, при которой не успевает произойти объемная усадка.

### 3.4.5. Литье под низким давлением

Литье под давлением 0,01...0,08 МПа применяется для изготовления отливок корпусного типа из алюминиевых, магниевых и медных сплавов массой от нескольких десятков граммов до 50 килограммов. Литейная форма 5 устанавливается на обогреваемую камеру 1 с тиглем 2, содержащим расплавленный металл (рис.3.12). Под действием сжатого воздуха или газа, подаваемого от регулирующей аппаратуры 4 на поверхность ванны расплава, жидкий металл поднимается по металлопроводу 3 и заполняет полость формы. После затвердевания металла производят разгерметизацию установки и излишки металла из металлопровода сливаются в тигель. Наличие единой гидродинамической системы позволяет управлять параметрами процесса заполнения формы расплавом. При этом способе практически исключается газовая и усадочная пористость в отливках. Формирование мелкозернистой, плотной, беспористой структуры обеспечивает увеличение прочности отливок на 15...25 % по сравнению с отливками в кокиль. Этот способ позволяет получать тонкостенные отливки с толщиной стенок 1,5...2 мм.

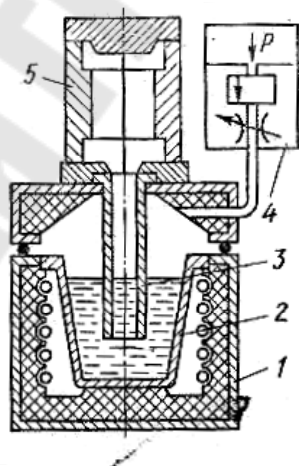


Рис. 3.12. Литье под низким давлением

Отливки под низким давлением получают в кокилях, песчаных и оболочковых формах и формах для литья по выплавляемым моделям. При этом способе литья сокращаются расходы металла на литниковые системы, улучшается заполняемость форм. Недостатком метода является ограниченное его применение для изготовления отливок из чугуна и стали из-за малого ресурса металлопровода.

### 3.4.6. Литье вакуумным всасыванием

Метод применяется для изготовления втулок, колец, гаек, колес компрессоров и др. деталей из медных, алюминиевых и др. сплавов. При этом способе литья литейная форма 3 заполняется расплавленным металлом 2 из тигля 1 за счет разряжения, создаваемого в ней вакуумным насосом.

Охлаждаемая водой металлическая форма устанавливается на плоское кольцо 2 из огнеупорного материала и погружается своим «носиком» в расплав, находящийся в тигле раздаточной печи (рис. 3.13).

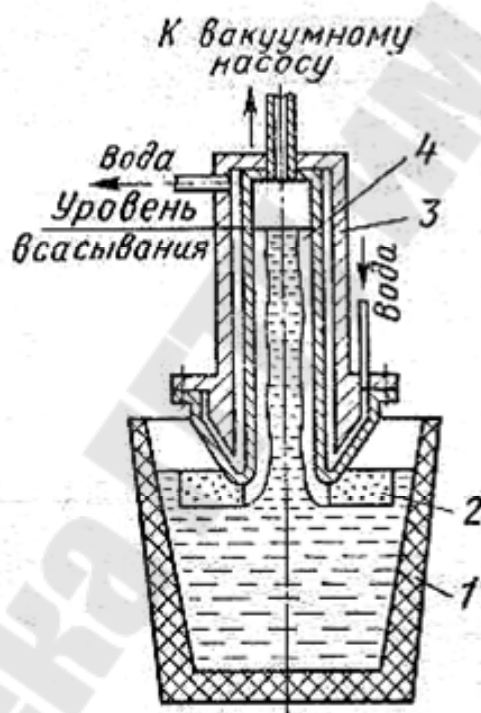


Рис. 3.13. Литье вакуумным всасыванием

В полости формы создается вакуум 10...80 кПа, в результате чего расплавленный металл всасывается в полость формы и кристаллизуется. После кристаллизации форма поднимается. Рабочая полость отключается от вакуумного насоса и отливка свободно удаляется из формы под действием собственного веса.

Этим способом изготавливают изделия простой формы (вкладыши, подшипники скольжения и др.). Метод позволяет получать тонкостенные изделия с толщиной стенки до 0,5 мм, отливки с мел-

ким зерном, производить полную дегазацию металла, заполняющего форму, исключить расхождение металла на литниковую систему, обеспечить высокое качество поверхности детали.

### 3.4.7. Литье намораживанием

Суть метода заключается в кристаллизации расплава металла на внутренних или наружных стенках водоохлаждаемого кристаллизатора. Кристаллизатор *1* опускается в расплав *3* и выдерживается необходимое время для получения нужной толщины стенки *2*. После извлечения из расплава кристаллизатора готовая отливка снимается с него (рис. 3.14). Литьем намораживанием получают осесимметричные полые отливки. Основным достоинством данного способа является направленное структурообразование металла отливки.

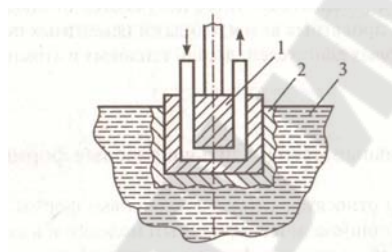


Рис. 3.14. Литье намораживанием

Затвердевание и рост кристаллов металла происходит в направлении теплоотвода – по радиусу кристаллизатора. Формирующаяся структура характеризуется ярко выраженным дендритным строением. Кристаллы ориентированы радиально. Их плотная упаковка позволяет существенно увеличить износостойкость цилиндрической поверхности сформированной отливки.

### 3.4.8. Литье методом жидкой прокатки

Данный метод совмещает в себе литье с прокаткой. Жидкий расплав поступает в металлоприемник *1*, плотно прилегающий к вращающимся навстречу друг другу водоохлаждаемым валкам *2* и *4*. В месте контакта расплава с валками кристаллизуются корочки металла, затягиваемые в зазор между валкам, соединяемые в единое целое. Меняя расстояние между валками можно регулировать толщину получаемого листа (рис. 3.15)



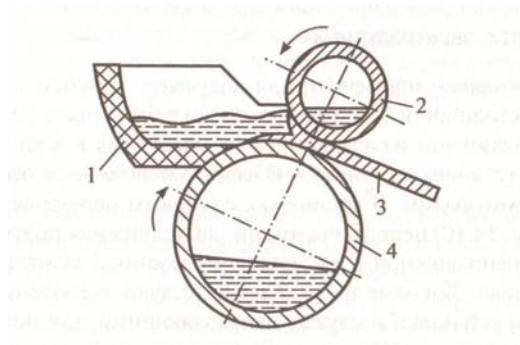


Рис. 3.15. Литье методом жидкой прокатки

### 3.4.9. Центробежное литье

Данный способ представляет собой процесс формирования отливки под действием центробежных сил при свободной заливке металла во вращающиеся формы. Отливки изготавливают в металлических, песчаных, оболочковых формах и в формах для литья по выплавляемым моделям на центробежных машинах с горизонтальной и вертикальной осью вращения (рис. 3.16).

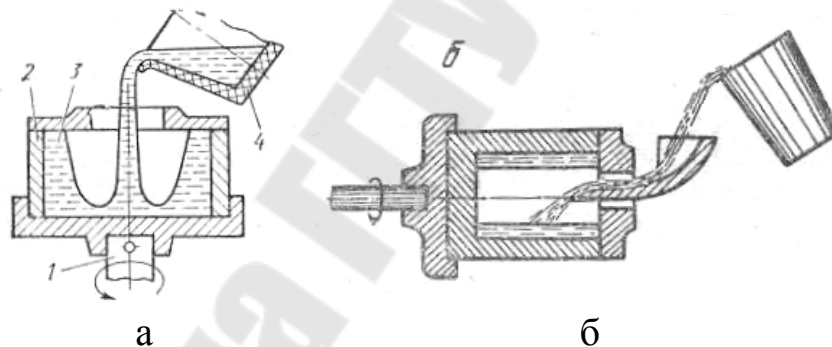


Рис. 3.16 Центробежное литье: а – с вертикальной осью вращения формы; б – с горизонтальной осью вращения формы; 1 – привод; 2 – литейная форма; 3 – расплавленный металл; 4 – разливочный ковш

Пустотелые отливки типа тел вращения (втулки, трубы, роторы и др.) получают на установках с горизонтальной осью вращения. Возможно получение отливок диаметром до 1,5 м, длиной до 109 м (на роликовых установках), с толщиной стенок от 4 до 350 мм. Фасонные отливки получают обычно на установках с вертикальной осью вращения. Частота вращения изложниц при центробежном литье со-



ставляет 150...1200 об/мин. Температура заливки сплавов на 100...150 °С выше их линии ликвидус.

Этот способ позволяет получать двухслойные заготовки, что достигается поочередной заливкой в форму различных сплавов (стали и чугуна, чугуна и бронзы и т.д.). По сравнению с литьем в неподвижные формы центробежный способ имеет следующие преимущества: при изготовлении полых осесимметричных отливок отпадает необходимость в изготовлении стержней, отсутствие литниковой системы и прибылей повышает выход годного литья, повышается плотность отливок. К недостаткам следует отнести увеличение степени ликвации сплавов, ухудшение качества поверхности детали и уменьшение точности отливок.

### 3.4.10. Непрерывное литье

*Непрерывным литьем* называется процесс получения протяженных отливок посредством свободной непрерывной заливки расплава в водоохлаждаемую форму 3 и вытягивания из нее с помощью тянущих роликов 5 сформированной части отливки 4. Исходя из расположения кристаллизатора 2 и технологической оси процесса, различают *горизонтальное и вертикальное литье*. Вертикальное литье применяется в основном для получения полых заготовок. Технологическая схема горизонтального непрерывного литья приведена на рисунке 3.17.

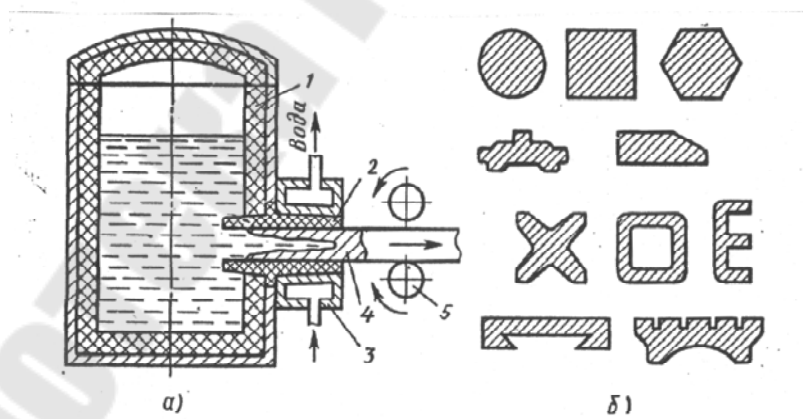


Рис. 3.17. Схема установки непрерывного литья (а) и примеры сечения изделий (б)

Рабочая полость кристаллизатора 3 выполняется металлической (медь, алюминий, сталь) или графитовой. Графитовая применяется чаще, так как имеет высокую термостойкость, низкий коэффициент

трения, высокую теплопроводность, не смачивается металлом. Длина кристаллизатора выбирается такой, чтобы на выходе из него кристаллизация сплава почти заканчивалась. Для цветных металлов она составляет около 300 мм, для черных до 1 м и более.

Преимуществами непрерывного способа литья являются: однородность свойств отливок по сечению, неограниченность длины отливки, отсутствие литниковой системы, соответственно, высокий выход годного литья, высокая точность и чистота поверхности отливки, невысокая стоимость технологической оснастки, высокая производительность труда, отсутствие пористости и усадочных раковин. Однако этим методом возможно изготовление отливок не очень сложной конфигурации ограниченной номенклатуры, только с параллельными образующими.

### **3.5 Изготовление отливок из различных сплавов**

В настоящее время в промышленности используются литые детали из различных сплавов. Наибольшее применение находят чугуны (более 70 %) и стальные отливки (около 23 %). В меньшей степени востребованы цветные металлы.

#### **3.5.1. Изготовление отливок из чугунов**

##### *Изготовление отливок из серого чугуна*

Основная масса чугунных отливок производится из серого чугуна, около 4 % из легированного, около 3 % из ковкого и 1 % из высокопрочного чугуна. Литье деталей из серого чугуна примерно в 1,5 раза дешевле стального и в несколько раз дешевле отливок из цветных металлов. Серый чугун обладает высоким временным сопротивлением разрыву (100...460 МПа), повышенной твердостью (140...283 НВ), малым относительным удлинением ( $\delta = 0,2...0,5 \%$ ), хорошо работает при сжимающих нагрузках, имеет высокие антифрикционные свойства, хорошо обрабатывается резанием, однако плохо работает на растяжение и при воздействии ударных нагрузок. Серый чугун маркируется буквами СЧ, за которыми следуют две цифры, обозначающие временное сопротивление разрыву, например, СЧ 25 ( $\sigma_B = 250$  МПа). В сером чугуне углерод содержится в виде графита, имеющего пластинчатую форму. Серый чугун имеет хорошие литейные свойства. Высокая жидкотекучесть, позволяет получать отливки с толщиной стенки 3...4 мм. Малая усадка (0,9...1,3 %), дает

возможность отказаться от прибылей при изготовлении мелких отливок.

По структуре серые чугуны бывают на ферритной, перлитно-ферритной и перлитной основе. Ферритные чугуны имеют невысокую прочность и применяются в основном для неответственных отливок. Перлитно-ферритные чугуны имеют повышенную прочность, дешевле перлитных чугунов и широко используются для различных машиностроительных отливок. Перлитные чугуны используют для более ответственных деталей.

На структуру и свойства отливки существенное влияние оказывает химический состав чугуна и скорость охлаждения отливки в форме. Углерод, кремний и марганец улучшают литейные и механические свойства. Сера вызывает «отбел» и снижает жидкотекучесть. Фосфор охрупчивает чугун. Механические свойства серого чугуна повышаются легированием, модифицированием, термической обработкой и другими способами.

Серый чугун выплавляют преимущественно в вагранках. Вагранка представляет собой шахту доменного типа с водоохлаждаемым кожухом, в которую через шлюзовое загрузочное устройство порциями (колошами) в течение всего периода плавки загружают шихту попеременно с коксом и флюсами. В качестве металлической шихты используют литейные и передельные доменные чугуны, чугуны и стальной лом, ферросплавы. Для горения топлива (кокс, природный газ) через фурмы подается подогретая до 450...550 °С воздушно-кислородная смесь. Расплавленный чугун по желобу и устройствам для отбора шлака сливается в копильник и далее поступает на участок разлива в формы. Ваграночные газы через узел отбора отсасываются для их дальнейшей очистки, дожигания и использования в воздухонагревателях. Для выплавки серого чугуна повышенного качества марок СЧ 25...СЧ 45 применяют дуговые и индукционные печи.

Обычно отливки изготавливают в песчаных формах и прибыли не предусматривают. Отливки повышенной прочности получают литьем в оболочковые формы, кокили, по выплавляемым моделям. При отливке чугуна в кокиль возможен его отбел. Поэтому целесообразно нанесение на его рабочие поверхности покрытий с низкой теплопроводностью и подогрев кокиля перед заполнением жидким металлом. Отливки осесимметричные, типа тел вращения, получают центробежным литьем.

Отливки из серого чугуна широко используют для изготовления станин станков, корпусов шпиндельных бабок, коробок передач, корпусов насосов, блоков цилиндров ДВС, гильз, поршневых колец, тормозных барабанов, различных корпусных деталей.

### *Изготовление отливок из высокопрочного чугуна*

В высокопрочном чугуне графит имеет шаровидную форму, для чего его модифицируют магнием или церием с последующим модифицированием ферросилицием в ковше непосредственно перед разливом. Высокопрочные чугуны имеют предел прочности до 1200 МПа, твердость 137...360 НВ, относительное удлинение 2...17 %, обладают высокой износостойкостью, хорошей коррозионной стойкостью, тепло- и жаростойкостью. Высокопрочные чугуны используют взамен стальных литых заготовок. Обозначают высокопрочный чугун буквами ВЧ и далее идут цифры, показывающие предел прочности при разрыве, например, ВЧ 80 ( $\sigma_b = 800$  МПа).

Аналогично серым чугунам по структуре металлической основы высокопрочные чугуны могут быть ферритными, ферритно-перлитными и перлитными. Кремний, марганец и фосфор снижают пластичность чугуна, поэтому количество их ограничено: кремния – до 2,4 %, марганца до 0,4 %, фосфора – до 0,1 %. Сера сдерживает сфероидизацию графита и ее содержание допускается не более 0,02 %.

Для плавки чугуна применяют водоохлаждаемые вагранки с основной футеровкой, а также дуговые и индукционные печи. Температура заливки в форму выбирается на 100...150 °С выше линии ликвидус. Отливка производится в различные формы, как и для серого чугуна.

Жидкотекучесть высокопрочного чугуна близка к таковой для серого чугуна, что позволяет получать отливки с толщиной стенок до 3...4 мм. Однако усадка у него достигает до 1,7 %, что требует ее учета и предусматривать в форме установку прибулей и холодильников.

Особенностью отливки заготовок из высокопрочного чугуна является то, что при введении в расплавленный чугун магния для глобуляризации графита происходит понижение температуры на 80...90 °С. Поэтому температура перегрева жидкого чугуна при разливе в ковше должна быть не менее 1420 °С. Для предотвращения образования трещин в отливках применяют формовочные смеси повышенной податливости.

Из высокопрочного чугуна изготавливаются детали машиностроения, работающие в условиях повышенных статических и динамических нагрузок. Это детали кузнечно-прессового оборудования, двигателей внутреннего сгорания, паровых и газовых турбин, коленчатые валы, прокатные валки, корпуса вентиля и др.

### *Изготовление отливок из ковкого чугуна*

Ковкий чугун получают путем длительного отжига отливок из белого чугуна (рисунок 3.18). При отжиге образуется хлопьевидный графит. Ковкий чугун имеет высокую прочность  $\sigma_b$  до 630 МПа, твердость до 270 НВ, относительное удлинение до 15%, высокую износостойкость, стойкость к ударным нагрузкам и вибрациям, хорошо обрабатывается резанием. Обозначается ковкий чугун буквами КЧ и далее предел прочности и относительное удлинение при разрыве, например, КЧ 63-2 ( $\sigma_b = 630$  МПа,  $\delta = 2$  %).

По структуре металлической матрицы ковкие чугуны бывают на ферритной или перлитной основе. Перлитные чугуны более прочные, но менее пластичные.

При производстве ковкого чугуна белый чугун плавят, как правило, дуплекс-процессом. Сначала чугун плавят в вагранке, а затем переливают его в индукционную или дуговую печь, где он нагревается до 1500...1550 °С и регулируют его химический состав по углероду, кремнию и марганцу.

Отливки из белого чугуна преимущественно изготавливают в песчаные формы, но применяют и литье в оболочковые формы и в кокиль. При изготовлении песчаных форм применяют формовочные смеси повышенной огнеупорности, податливости и газопроницаемости, т.к. усадка белого чугуна более 2 %. Необходимо обязательно предусматривать прибыли.

Отливки из белого чугуна после очистки загружают в стальные контейнеры, которые герметично закрывают и отправляют в специальные печи для отжига.

Для получения ковкого чугуна на ферритной основе отливки медленно нагревают до температуры 950...1000 °С и длительно выдерживают при этой температуре. Цементит первичный распадается на аустенит и графит. Производится промежуточное охлаждение до 760...740 °С, при котором аустенит превращается в перлит. При последующей длительной выдержке при температуре 740...720 °С це-

ментит вторичный, входящий в перлит, распадается на феррит и графит. Весь процесс отжига длится 22...32 часа.

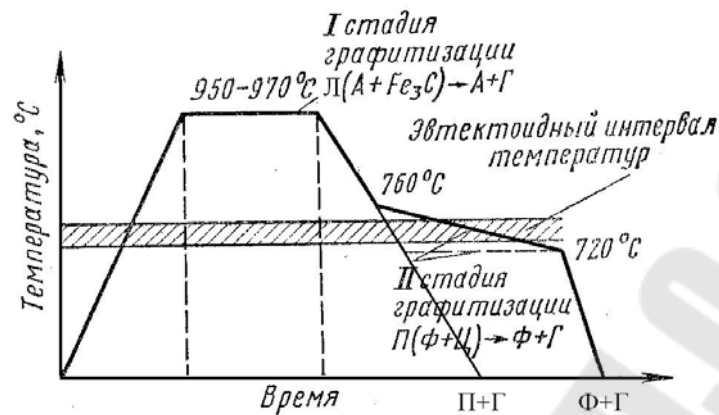


Рис. 3.18. График отжига белого доэвтектического чугуна на ковкий.

Для получения ковкого чугуна на перлитной основе достаточно произвести одноступенчатый отжиг, длительность которого составит 17...24 часа.

Из ковкого чугуна изготавливают детали с толщиной стенок 3...50 мм, испытывающие вибрационные и ударные нагрузки, различные кронштейны, рычаги, корпусные детали сельхозмашин и др. Получение отливок с толщиной стенки более 50 мм нецелесообразно вследствие снижения скорости охлаждения до значений, при которых происходит распад цементита с образованием графита пластинчатой формы. Это приводит к тому, что последующий отжиг не позволяет получать ковкий чугун с однородной структурой, характеризующейся хлопьевидной формой графита.

### 3.5.2. Изготовление стальных отливок

Для изготовления отливок используют углеродистые и легированные стали. Буква Л, стоящая в конце марки стали, обозначает ее принадлежность к литейным сплавам (30ХГСЛ, 20Л, 110Г13Л).

Стали имеют намного худшие литейные свойства, чем чугуны: пониженную жидкотекучесть, значительную усадку (до 2,5 % линейную и до 7,5 % объемную), склонны к образованию трещин.

Для плавки литейных сталей используют, как правило, дуговые и индукционные печи, а также плазменно-индукционные печи. Последние имеют выше производительность на 25...30 % и экономичнее по расходу электроэнергии. В качестве шихты используют стальной

лом, переделный чугун, руду, флюс и другие добавки. Отливки изготавливают литьем в песчаные и оболочковые формы, кокиль и др. В связи с низкой жидкотекучестью заливку стали в форму производят при повышенных температурах порядка 1550...1650°C. Подвод металла в полость формы для мелких отливок производят сверху, а для крупных – снизу (сифоном). Обязательно применение прибылей и холодильников. Площадь питателей по сравнению с литниками для серого чугуна увеличивается в 1,5...2 раза. Для изготовления форм также должны выбираться формовочные смеси повышенной огнеупорности и податливости. Улучшение свойств отливок может быть достигнуто путем термообработки – отжига или нормализации.

Стальные отливки получают литьем в песчано-глинистые формы, оболочковые формы, центробежным способом, в облицованный кокиль.

Из стального литья изготавливают различные детали машиностроения: зубчатые колеса, станины и валки прокатных станков, цилиндры, турбинные лопатки, арматуру химической и нефтегазовой аппаратуры и т.д.

### **3.5.3. Изготовление отливок из алюминиевых сплавов**

Согласно ГОСТ 1583-93 обозначение литейных алюминиевых сплавов начинается с буквы А, после которой указывается условное обозначение легирующих элементов вводимых в расплав с целью улучшения его технологических, механических и др. характеристик. Например, АК7 расшифровывается как алюминиевый литейный сплав в котором содержится 6-8% кремния, а остальное за вычетом примесей – алюминий. В случае многокомпонентной модификации сплава его маркировка отражает наличие всех элементов вводимых с целью изменения свойств – АК5М (4,5-5,5 % кобальта, около 1 % меди, остальное за вычетом примесей алюминий). Кремний является основным легирующим элементом литейных алюминиевых сплавов. В связи с этим они получили название *силумины*. До 21 октября 1993 года обозначение алюминиевых сплавов состояло из двух букв АЛ (алюминий литейный) и цифры, означающей порядковый номер сплава. Например АЛ2, АЛ4 и т.д. Такие обозначения в настоящее время также встречаются в технической документации. Для расшифровки химического состава данных обозначений используется ГОСТ 2685-75.

Предел прочности литейных алюминиевых сплавов может достигать 340 МПа, относительное удлинение при разрыве 1,5...12 %, твердость 50...90 НВ. Сплавы АЛ8, АЛ13 имеют повышенную коррозионную стойкость в морской воде, хорошо работают при вибрационных нагрузках. Все алюминиевые сплавы хорошо обрабатываются резанием. Большинство остальных сплавов имеют невысокую жидкотекучесть, повышенную усадку, склонность к трещинообразованию.

Плавку алюминиевых сплавов осуществляют в камерных стационарных или поворотных электропечах сопротивления, индукционных печах промышленной частоты и др. В качестве шихты используют технически чистый алюминий, силумины, отходы производства, лигатуру и др. добавки. Для удаления водорода и неметаллических включений сплавы рафинируют гексахлорэтаном продувая им расплав при температуре 740...750 °С в течении 0,3...0,4 минут. Измельчение зерна в силуминах производят путем модифицирования натрием или стронцием. Натрий вводят в сплав в виде солей при температуре 730...780 °С, а стронций - в составе лигатуры.

Отливки из алюминиевых сплавов изготавливают преимущественно литьем в кокиль, подогретый до 250...350 °С для простых по форме деталей и до 400...500 °С для сложных. Применяют также литье под давлением, в песчаные формы и др.

Из алюминиевых сплавов изготавливают блоки двигателей внутреннего сгорания, головки блоков, корпуса насосов, судовые винты и детали электро – и радиоаппаратуры, авиационные детали.

#### **3.5.4. Изготовление отливок из медных сплавов**

Для изготовления отливок используют литейные латуни и бронзы, например, БрО5Ц5С5, ЛЦ40Мц3А. Эти сплавы имеют временное сопротивление при разрыве 195...705 МПа, относительное удлинение при разрыве 3...20%, хорошие антифрикционные и антикоррозионные свойства. Многие из сплавов хорошо противостоят кавитации. Лучшей текучестью обладают бронзы. Усадка оловянистых бронз составляет 1,4...1,6 %, безоловянных – 1,6...2,4 %. Среди латуней наилучшими литейными свойствами обладают сплавы, содержащие около 39 % цинка.

Медные сплавы плавят в индукционных канальных низкочастотных и др. печах на воздухе, в среде защитных газов или в вакууме.



В качестве шихты используют чистую медь, отходы производства Zn, Sn, Pb, Fe, Ni и др. металлы. При плавке на воздухе для предотвращения окисления меди плавку ведут под слоем древесного угля. Нагретый до 1200 °С расплав раскисляют фосфористой бронзой, затем вводят лигатуру или чистый металл для регулирования химического состава. Отливку производят в основном в песчаные или оболочковые формы, а также под давлением, в кокиль и др.

Бронзы оловянистые применяют для изготовления арматуры, шестерен, подшипников, втулок и т.д. Безоловянные бронзы используют для тяжело нагруженных деталей: зубчатых колес, гребных винтов, арматуры для морской воды, деталей химической и пищевой промышленности.

Латуни используют для изготовления нажимных винтов и гаек прокатных станков, червячных винтов, деталей морского судостроения и др., работающих при температурах до 300 °С.

### **3.5.5. Изготовление отливок из магниевых сплавов**

Для изготовления отливок используют сплавы МЛ1...МЛ19, где цифра указывает порядковый номер сплава. Эти сплавы имеют временное сопротивление при разрыве до 350 МПа, относительное удлинение при разрыве 3...9 %, твердость 30...70 НВ, хорошо работают при динамических нагрузках, имеют удовлетворительную коррозионную стойкость, хорошо обрабатываются резанием. Однако они имеют пониженную жидкотекучесть, повышенную усадку, склонны к образованию трещин, хорошо растворяют водород, склонны к самовозгоранию при плавке и разливке в формы.

Магниевые сплавы плавят в тигельных электропечах сопротивления и индукционных печах промышленной частоты. В качестве шихтовых материалов применяют чушковый магний и алюминий, лигатуру, отходы производства, флюсы и др. Во избежание возгорания плавку проводят под слоем универсальных флюсов из хлористых и фтористых солей щелочных и щелочноземельных металлов или в среде защитных газов. После расплавления всех составляющих шихты сплав нагревают до 700...720 °С и проводят рафинирование универсальным флюсом. При рафинировании удаляют водород и неметаллические включения. Для повышения уровня механических свойств сплавы подвергают модифицированию перегревом или введением углеродсодержащих веществ (нагрев до 850...925 °С, выдерж-

ка 10...15 мин и быстрое охлаждение до 680...720 °С). При этом измельчается зерно. Отливки изготавливают в основном в песчаных формах, но применяют и другие методы литья. Для предотвращения загорания магниевых сплавов в литейной форме в состав формовочных смесей вводят защитные присадки. Чтобы предотвратить загорание магния при заливке форм струю расплава припыливают порошком серы. Образующийся сернистый газ предотвращает возгорание. При получении отливок в кокиль для предотвращения образования трещин необходим подогрев кокилей до 250...350 °С и металлических стержней до 300...450 °С. Из магниевых сплавов изготавливают корпусные детали насосов, арматуру, бензо-масляную аппаратуру, инструмент, корпуса тормозных барабанов и др.

### **Технологичность конструкций литых деталей**

Деталь, полученная литьем, должна иметь заданную конфигурацию и размеры, шероховатость поверхности, массу, прочность. При конструировании отливки необходимо учитывать особенности изготовления и применения модельного комплекта, чтобы не допустить возникновения дефектов в отливке, литейные свойства сплавов и способы дальнейшей обработки детали.

Минимальную толщину необрабатываемых стенок отливки рассчитывают в зависимости от усредненного габаритного размера – N:

$$N = \frac{(2l + b + h)}{3},$$

где l, b, h – длина, ширина и высота отливки.

Внутренние стенки и ребра жесткости изготавливают на 10-20 % тоньше наружных для обеспечения условий равномерного затвердевания.

Необходимо предусматривать наиболее простую внешнюю конфигурацию и по возможности равномерную толщину стенок. Для предотвращения образования трещин при кристаллизации металла и охлаждении отливки необходимо предусматривать плавный переход в местах сопряжения стенок. Избегать местного скопления большого количества металла, с целью предотвращения образования усадочных раковин.

Особое внимание необходимо уделять устранению резких перепадов толщин отливок.

При T-образном или крестообразном пересечении стенок детали диаметр вписанной окружности в месте пересечения должен быть не более 1,5 толщины стенок. При крестообразном расположении

стенок целесообразно смещение их, превратив в Т-образные пересечения, или выполнение отверстия по центру пересечения, обеспечивая равнотолщинность на перекрестке (рис. 3.19).

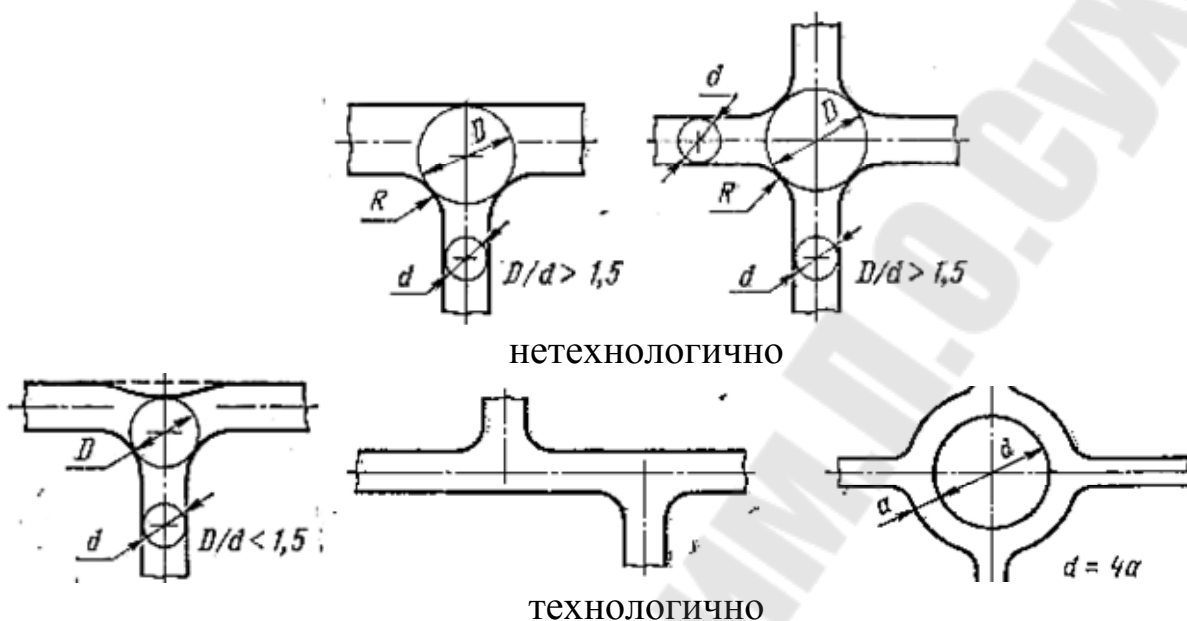


Рис. 3.19. Рекомендуемое пересечение стенок изделия

Внешняя конфигурация детали должна способствовать максимальному упрощению формовки. Для обеспечения более свободной усадки и облегчения формовки стенки отливок желательно выполнять коническими (рис.3.20).

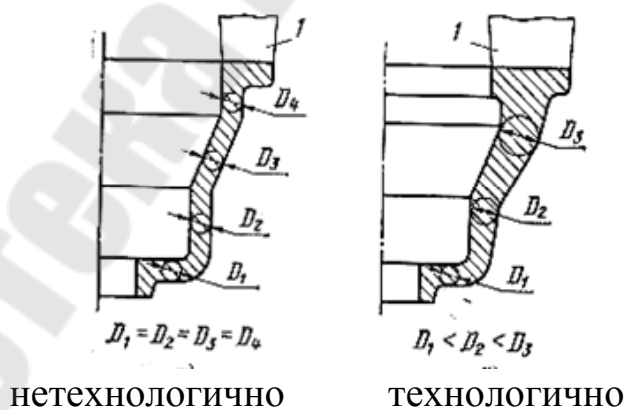


Рис. 3.20. Рекомендуемое выполнение стенок для обеспечения более свободной усадки

Для повышения жесткости стенок корпусных деталей необходимо предусматривать изготовление их с ребрами жесткости и буртиками в местах разъема.

Конструкция отливки должна иметь одну плоскость разъема (рис. 3.21а).

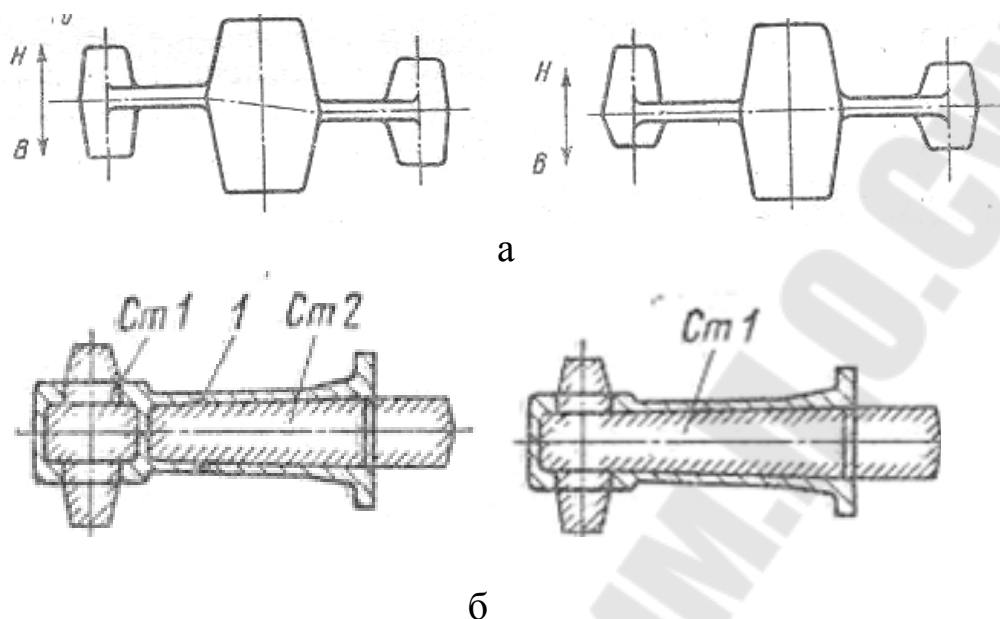


Рис.3.21. Примеры упрощения технологии изготовления отливки

Уклоны отливки должны обеспечивать минимальное количество стержней.

Бобышки и приливы не должны затруднять извлечение модели из формы.

При изготовлении внутренних полостей отливок необходимо избегать применения нескольких стержней, наиболее рациональной считается конструкция с одним стержнем (рис. 3.21б).

### ***Дефекты, образующиеся в отливках***

В отливках могут возникать следующие дефекты:

1. Раковины – газовые, сорные, шлаковые, усадочные, рыхлость и пористость.
2. Трещины – горячие, холодные и термические.
3. Дефекты поверхности – пригар, ужимины, наросты, механические повреждения.
4. Несоответствие размеров, массы, конфигурации отливок – недоливы, заливы, перекося, сдвиг, коробление, разностенность, искажение размеров.

5. Несоответствие металла отливок техническим условиям – по химическому составу, макро- и микроструктуре, наличие отбела, ликвация.

### ***Методы технического контроля в литейном производстве***

Для обнаружения дефектов в отливках применяют следующие мероприятия:

*Визуальный осмотр.* Применяется для обнаружения крупных наружных дефектов, (пригар, недоливы, перекося, сдвиг частей отливки, коробление, разнотолщинность стенок, трещины и др.).

*Ультразвуковая или рентгеновская дефектоскопия.* Позволяют определять внутренние дефекты – раковины, пористость, шлаковые включения, трещины и др.).

*Магнитная или люминесцентная дефектоскопии.* Используются в основном для обнаружения мелких трещин невидимых невооруженным глазом.

### ***Методы исправления дефектов в отливках***

Устранения наружных, крупных пор в ответственных местах осуществляется в основном путем заварки, в основном дуговой сваркой.

Для устранения внутренней пористости применяется пропитка раствором хлористого аммония ( $NH_3Cl$ ). Хлористый аммоний, проникая сквозь кристаллы металла, образует в порах оксиды, заполняющие пустоты.

Для устранения наружных крупных пор в неответственных местах осуществляется замазка мастиками для улучшения внешнего вида поверхности отливок.

### **3.5.6. Охрана труда и окружающей среды в литейном производстве**

В процессе изготовления отливок выделяется большое количество различных газов (оксид углерода, сернистый газ, аммиак, хлор, дымовые газы, продукты деструкции связующих, пары воды), фториды, хлориды, пыль кремнезема, оксида цинка и магния, кокса, извести и др., некоторые из них токсичны.

Для снижения выбросов в атмосферу разработаны вагранки закрытого типа, в которых отходящие газы полностью отбираются, подвергаются эффективной очистке, дожигаются, а теплота утилизируется. Снижаются выбросы при использовании новых нетоксичных связующих, применении литья в металлические формы.

При использовании индукционных печей промышленной частоты плавка шихты производится под слоем защитного флюса. В отдельных случаях возможно вакуумирование внутреннего пространства печи над зеркалом расплава.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Какие свойства сплавов относятся к литейным и как они влияют на качество отливок?
2. Что входит в модельный комплект и его назначение?
3. Перечислите последовательность операций изготовления песчано-глинистых форм.
4. Перечислите методы уплотнения формовочных смесей при изготовлении песчаных форм в опоках.
5. В чем особенности изготовления отливок в оболочковые формы и каковы возможности этого способа?
6. В чем состоит сущность получения отливок литьем по выплавляемым моделям и каковы возможности этого способа?
7. В чем особенности изготовления отливок в кокиль и литьем под давлением?
8. Особенности непрерывного литья и области применения.
9. Сущность метода центробежного литья и области применения.

## Глава 4. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

### 4.1. Общая характеристика обработки металлов давлением

*Обработкой давлением (ОМД)* называется технологический процесс изготовления изделий или заготовок путем пластического деформирования материалов приложенным извне усилием. Обработкой давлением изготавливают из металла полуфабрикаты, детали и изделия различной массы, размеров и форм.

В современной металлообрабатывающей промышленности ОМД является широко распространенным способом формообразования заготовок для деталей машин и приборов. Этими методами перерабатывается около 90 % стали и более 50 % цветных сплавов. Наиболее распространенными методами обработки металлов давлением являются: прокатка, прессование, волочение, ковка, штамповка. Прокатка, волочение и прессование сосредоточены в основном на металлургических комбинатах или на крупных машиностроительных предприятиях. Основная их продукция – изделия постоянного поперечного сечения (трубы, рельсы, сортовой и листовой прокат, проволока и др.). Остальные методы применяют на машиностроительных предприятиях для получения заготовок и деталей различной массы, формы и размеров. Технологические процессы ОМД отличаются высокой производительностью, экономичным расходом металла по сравнению с литейным производством и механической обработкой, высокой степенью механизации и автоматизации.

*Процесс обработки давлением заключается в придании материалу заготовки требуемой формы, размеров и физико-механических свойств без нарушения его сплошности (за исключением разделительных операций) путем пластической деформации.* Различают формообразующие и разделительные операции ОМД. К **формообразующим** относятся: прокатка, прессование, волочение, ковка, штамповка, высадка, вытяжка, гибка, отбортовка, раздача и др. К **разделительным** операциям относятся: отрубка, резка, прошивка.

При воздействии внешних сил на твердое тело в нем возникают *упругие и пластические деформации*, уровень которых зависит от величины действующих сил. При *упругой деформации* происходит смещение атомов в кристаллической решетке на расстояния, не превышающие 10 % от размера решетки. При снятии внешней нагрузки

атомы легко возвращаются в исходное положение. Упругая деформация обратима.

*Пластическая деформация* возникает при смещении атомов на расстояния превышающие параметры кристаллической решетки и после снятия внешней нагрузки, атомы в исходное состояние не возвращаются, т.е. она не обратима. При пластическом деформировании происходит изменение геометрических размеров заготовки и изменение исходной структуры металла. Масштабы этих изменений зависят от величины прикладываемых усилий, температурных условий и скорости деформирования. Изменение исходной структуры при пластическом деформировании приводит к повышению механических свойств исходного материала, называемому *наклепом*.

В зависимости от температурно–скоростных условий деформирования различают горячую и холодную обработку давлением.

*Холодная деформация* характеризуется изменением формы зерен, которые вытягиваются в направлении наиболее интенсивного течения металла. В связи с трансформацией формы зерен и увеличением плотности дислокаций в пограничных зонах происходит изменение физико-механических свойств металла и появление их анизотропии. Характеристики прочности при этом возрастают, а пластичности – снижаются. Возникшую ориентацию зерен и анизотропию свойств можно устранить путем рекристаллизационного отжига, заключающегося в медленном нагреве изделий в печи до температуры выше температуры рекристаллизации, но ниже температуры  $A_{c1}$  (перекристаллизации), выдержке для протекания процессов образования и роста новых равноосных зерен без фазовых превращений и медленном охлаждении вместе с печью. Температура рекристаллизации для большинства металлов составляет около  $0,4 T_{пл}$ . После рекристаллизационного отжига устраняется ориентация зерен, снимаются внутренние напряжения, возникшие при деформировании, несколько снижаются прочностные характеристики и восстанавливается пластичность.

К процессам *горячего пластического деформирования* относится *формоизменение заготовки при температурах выше температуры рекристаллизации*. При горячем деформировании также происходят процессы аналогичных структурных изменений, как и при холодном деформировании, однако они сразу же устраняются протекающими при этих температурах рекристаллизационными процессами. Ярко выраженного наклепа не происходит. Однако образующаяся



новая равновесная микроструктура после горячего деформирования получается более мелкозернистой, что приводит к повышению прочности, а также пластичности и ударной вязкости. Кроме этого волокна металла, образованные вытянутыми границами зерен, содержащими неметаллические включения, образуют характерную текстуру. Чтобы обеспечить условия протекания горячей деформации приходится с увеличением скорости деформирования повышать температуру нагрева для увеличения скорости рекристаллизационных процессов.

При горячем деформировании сопротивление деформации примерно в 10 раз меньше, чем при холодном и оно незначительно изменяется в процессе обработки давлением. Соответственно, для получения детали требуются меньшие усилия и менее мощное оборудование. Поэтому горячее деформирование применяют для изготовления крупных деталей. Его применение целесообразно при обработке трудно деформируемых, мало пластичных материалов, а также при изготовлении деталей из отливок. Однако при горячем деформировании происходит интенсивное окисление поверхности заготовок, что приводит к образованию окалины. Это ухудшает качество поверхности и точность получаемых изделий, а также приводит к потере до 3 % массы металла за счет угара.

Холодное деформирование обеспечивает большую точность геометрических размеров и лучшее качество поверхности детали по сравнению с горячим деформированием, сокращает длительность технологического цикла, т.к. исключает нагрев заготовки, упрощает использование средств механизации и автоматизации, повышает производительность труда. Но для достижения высокой степени пластической деформации, аналогичной горячей обработке, требуется приложить значительно более высокие давления.

Под действием внешних сил при деформировании в материале возникают напряжения, величина и характер которых зависят от рассматриваемого сечения, направления и величины действующей силы. При действии продольного растягивающего усилия  $P$  в образце цилиндрического сечения в плоскости 1-1 (рис. 4.1), перпендикулярной направлению действия силы, возникает нормальное напряжение:

$$\sigma_1 = P/F_1,$$

где  $F_1$  - площадь поперечного сечения в плоскости 1-1 .

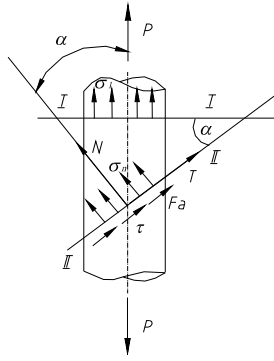


Рис. 4.1. Схема напряженного состояния при одноосном растяжении цилиндрического образца

Напряженное состояние материала в сечениях, расположенных под некоторым углом  $\alpha$  к направлению действия силы  $P$  будет отличаться от описанного выше. Для определения напряжений в плоскости 2-2 разложим силу  $P$  на составляющие: нормальную  $N$  и касательную  $T$

$$N = P \cdot \cos \alpha \quad \text{и} \quad T = P \cdot \sin \alpha.$$

Площадь сечения  $F_\alpha = F_1 / \cos \alpha$ . Тогда нормальное напряжение в данной плоскости

$$\sigma_\alpha = N / F_\alpha = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha.$$

Под действием касательной силы возникает касательное напряжение

$$\tau = T / F_\alpha = (\sigma_1 / 2) \cdot \sin 2\alpha.$$

Касательное напряжение в отличие от нормального действует в плоскости 2-2 и стремится сдвинуть одну часть образца относительно другой. Максимальное значение  $\tau$  будет иметь в плоскости сечения, расположенной под углом  $45^\circ$  к действующей силе, и составит  $\tau = \sigma_1 / 2$ . В плоскости 1-1 при  $\alpha = 0$  касательное напряжение будет равно 0.

Именно касательное напряжение является причиной пластической деформации, которая совершается путем скольжения или двойникования (рис. 4.2).

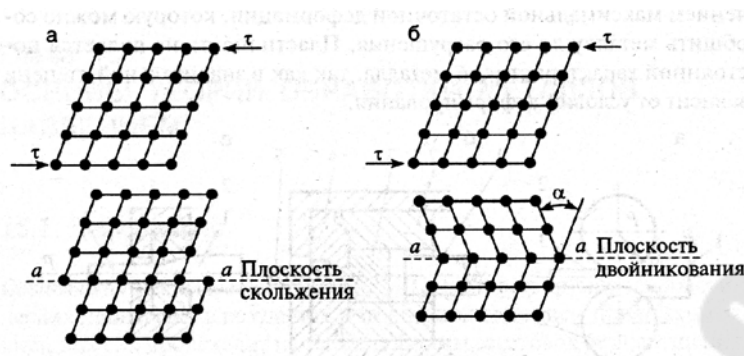


Рис. 4.2. Схемы пластической деформации скольжением (а) и двойникованием (б)

*Скольжение* - смещение одной части кристаллической решетки или зерна металла относительно другой по определенным кристаллографическим плоскостям и направлениям скольжения. *Двойникование* – поворот части кристалла относительно плоскости двойникования в положение зеркального отображения. Оно чаще всего наблюдается при пониженной температуре деформации и динамическом (ударном) деформировании металла с гексагональной решеткой.

Плоскости скольжения представляют собой плоскости с наиболее плотной упаковкой атомов, а направлениями скольжения являются направления, по которым межатомное расстояние минимально. Количество таких плоскостей и направлений определяется природой металла, и чем их больше, тем пластичнее металл.

Особое значение при скольжении играют дислокации – линейные дефекты кристаллической решетки. Они в процессе пластической деформации перемещаются микроскачками вдоль плоскости скольжения. В связи с этим при сдвиге одной кристаллической плоскости относительно другой отсутствует необходимость преодолевать силы связи всех атомов, лежащих в данной плоскости решетки кристаллита, и сдвиг ее отдельных слоев значительно облегчается.

При обработке металлов давлением различают *деформацию внутрикристаллитную*, т.е. протекающую внутри зерна, и *межкристаллитную*, протекающую по границам зерен.

Внутрикристаллитная деформация преобладает на начальной стадии деформирования в тех зернах, плоскости скольжения которых совпадают с направлением максимальных касательных напряжений (рис. 4.3).

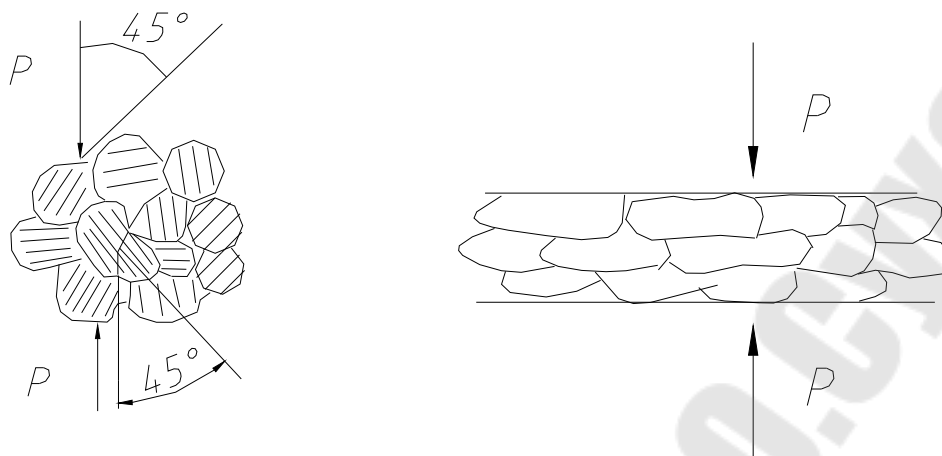


Рис. 4.3. Деформирование зерен при воздействии сжимающих сил

При этом изменяется форма деформируемых зерен. Внешние нагрузки перераспределяются на соседние зерна, вовлекая их в процесс деформирования. После завершения деформирования зерна вытягиваются в направлении интенсивного течения металла.

Пластичность при обработке металлов давлением зависит от природы металла или сплава, его химического состава, структуры, механических свойств, температуры нагрева, скорости и степени деформирования, а также от схемы напряженного состояния.

Пластичность литого крупнозернистого металла ниже, чем у отожженного мелкозернистого. Повышение температуры стали выше  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводит к увеличению пластичности. Но перегрев выше  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  для большинства сталей приводит к резкому снижению пластичности из-за роста зерен и окисления их границ. Увеличение скорости деформирования приводит к уменьшению пластичности. Однако при очень больших скоростях деформирования пластичность значительно увеличивается.

Нормальные напряжения, действующие в плоскости сечения с нулевыми касательными напряжениями, называются **главными нормальными напряжениями**. Растягивающие напряжения считаются положительными, а сжимающие – отрицательными.

Напряженное состояние в материальной точке может быть линейным, когда действует только одно главное напряжение, плоским – если имеются 2 главных напряжения, объемным – при наличии 3 главных напряжений отличных от нуля.

Касательные напряжения  $\tau$  осуществляют сдвиг атомов в плоскостях скольжения, обеспечивая как упругую, так и пластическую деформацию. Значение напряжения, при котором происходит пласти-

ческая деформация, называется напряжением текучести ( $\tau_s$  или  $\sigma_s$ ). Величина напряжения текучести зависит от природы металла, температуры, скорости деформирования, характера напряженного состояния деформируемого материала.

Напряженное состояние материала характеризуется схемой главных нормальных напряжений. Основные схемы напряженного состояния приведены на рисунке 4.4.

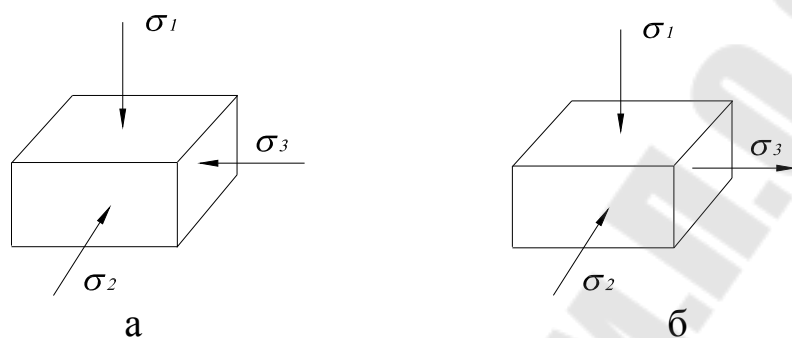


Рис. 4.4. Схемы напряженных состояний:

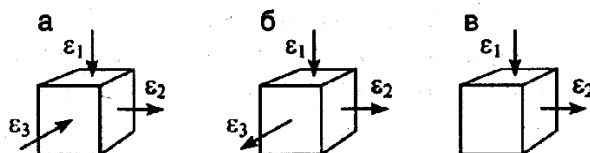
а – при прокатке, прессовании, ковке, горячей объемной штамповке; б – при волочении и листовой штамповке

Пластическую деформацию оценивают *степенью деформации*, показывающей на сколько процентов изменяются линейные размеры деформируемого тела. Степень деформации, при которой возникают в металле трещины, называется *предельной*. Способность материала пластически деформироваться называется *пластичностью*, которая характеризуется максимальной остаточной деформацией, которую материал может выдержать без разрушения. Пластичность не является константой материала, а зависит от условий деформирования.

*Предельная степень деформации материала* зависит от пластичности материала, температуры и скорости деформирования, характера напряженного состояния. Например, для стали предельная степень деформации при растяжении составляет 20...30 %, при одноосном сжатии – 80...100 %, а при неравномерном всестороннем сжатии – до 300 % и более.

Наибольшая пластичность металла проявляется при объемном неравномерном сжатии (рисунок 4.4 а). Всестороннее неравномерное сжатие характерно для таких процессов как: прокатка, прессование, горячая объемная штамповка, выдавливание. Двустороннее неравномерное сжатие с односторонним растяжением возникает при таких операциях как волочение и листовая штамповка.

Деформационное состояние характеризуется схемой главных деформаций, возникающих в направлениях действия главных напряжений. Схемы главных деформаций дают представление о характере деформирования, о возможной анизотропии структуры (рис. 4.5).



Рис/ 4.5. Схемы главных деформаций:

а - при волочении и прессовании; б – при прокатке, ковке, объемной штамповке; в – при прокатке листового материала без увеличения ширины листа

#### 4.2. Влияние температуры на пластичность металлов

С повышением температуры увеличиваются максимальное относительное удлинение и предельная степень деформации, а сопротивление деформированию уменьшается. Однако для каждого металла есть свои температурные пределы. При нагреве сталей до температуры близкой к  $0,9 T_{пл}$  по границам аустенитных зерен образуются хрупкие оксидные пленки, происходит полная потеря пластичности, что является неисправимым браком – пережегом. Нельзя допускать также перегрева металла, который проявляется при длительном нагреве заготовки до температур близких или превышающих верхнюю границу температурного интервала. В результате перегрева происходит резкий рост размеров зерна и снижается пластичность. Это негативно сказывается на свойствах готовой поковки и зачастую приводит к образованию горячих и холодных трещин в металле.

Горячую обработку давлением необходимо производить в строго определенном диапазоне температур. Верхняя граница должна предотвращать перегрев металла, а нижняя – обеспечить рекристаллизацию и не допускать образования крупнозернистой структуры. Нижняя температура составляет  $0,6...0,7 T_{пл}$ . Если после окончания деформации металл имеет структуру не полностью рекристаллизованную, то такая деформация называется *неполной горячей деформацией*, которая приводит к образованию неоднородной структуры, что

нежелательно. При горячей обработке давлением слитков разрушается дендритная кристаллическая структура металла, завариваются дефекты: микропоры и газовые пузыри, разрушаются кристаллиты. Неметаллические включения вытягиваются в направлении преимущественного течения металла. Структура металла с расположенными вдоль его течения неметаллическими включениями называется *волоконистой*. При последующей термической обработке такую структуру изменить невозможно. Следствием такой структуры является анизотропия свойств.

Важным аспектом является равномерность нагрева деталей по всему объему. При неравномерном прогреве возникают большие термические внутренние напряжения, что может привести к образованию трещин. Однако с увеличением длительности нагрева увеличивается степень окисления поверхности металла. Образующаяся окалина имеет высокую твердость и хрупкость. Частицы окалины вдавливаются в поверхность заготовки при деформировании, вследствие чего необходимо предусматривать большие припуски на механическую обработку. Кроме того, эти частицы являются абразивом, приводящим к износу рабочих поверхностей технологической оснастки. Длительное воздействие высоких температур может привести к обезуглероживанию поверхностей стальных заготовок на глубину до 1.5...2 мм. Для предотвращения окисления заготовки нужно нагревать ее в нейтральной или восстановительной атмосфере, а также использовать электроконтактный нагрев.

Существенное значение имеет режим нагрева заготовки. *Нагрев до температуры 700...800 °С в области пониженной пластичности целесообразно осуществлять медленно для исключения возникновения высоких внутренних напряжений и образования трещин, а в области повышенной пластичности (более 800 °С) производить ускоренный нагрев, т.к. пластическая деформация будет компенсировать эти напряжения.*

В качестве нагревательного оборудования используются нагревательные печи, индукционные нагреватели и установки электроконтактного нагрева. **Нагревательные печи** классифицируются по следующим основным признакам:

- по источнику энергии: пламенные и электрические;
- по назначению: кузнечные и прокатного производства;
- по принципу действия: камерные и методические.

**Камерными** называются печи, рабочее пространство которых имеет одинаковую температуру. Разогрев осуществляется за счет сгорания топлива (газ, мазут) или тепла, излучаемого электронагревателями. Заготовки 4 располагают на подвижном или неподвижном поде 6. Подвижный под используется при нагреве крупных заготовок. В пламенных печах топливо сгорает в воздушной атмосфере, при этом угар заготовок может достигать до 3 %. При электрическом нагреве в защитной среде угар снижается до 1 %.

В камерных печах с электроподогревом в качестве источника тепла используются нагреватели, изготовленные из специальных сплавов с высоким электрическим сопротивлением. Спиральные нагреватели из таких сплавов расположены под подом и в специальных каналах вдоль стен печи. Под такой печи чаще изготавливают неподвижным. Температура в электропечах поддерживается автоматически.

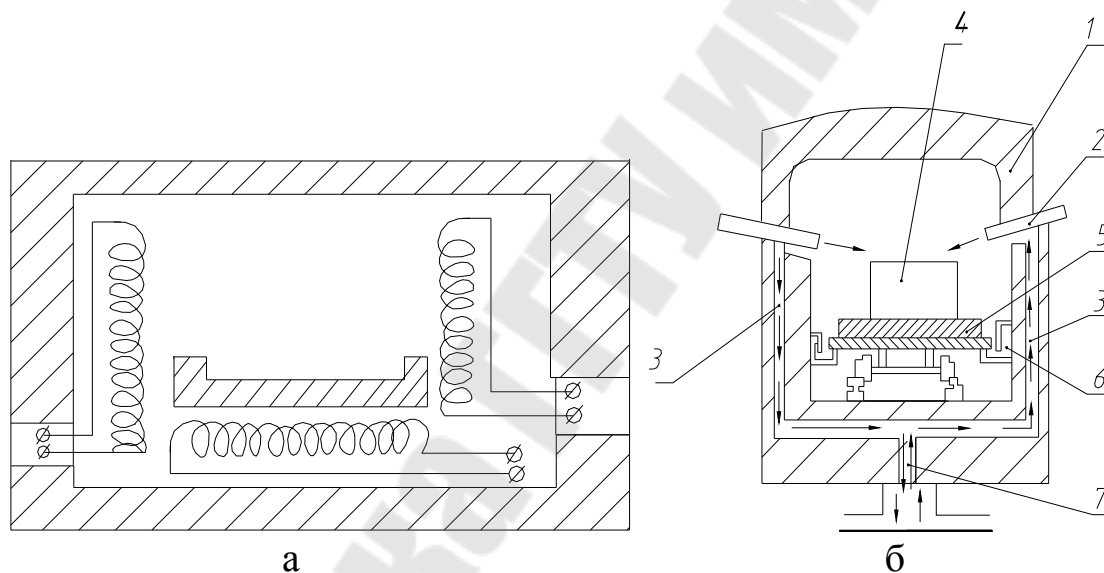


Рис. 4.6. Схемы камерных печей: а – с электрическим нагревом; б – с пламенным разогревом рабочего пространства

Печи, в рабочем пространстве которых температура повышается от окна загрузки к окну выгрузки, называют **методическими**. В таких печах поток горячих газов (продуктов сгорания топлива) движется навстречу потоку нагреваемых заготовок 2, чем обеспечивается их постепенный равномерный разогрев (рис. 4.7.). Круглые заготовки 2 перекатываются по поду 3 за счет периодического возвратно-поступательного действия толкателя 4. Из зоны нагрева до максимальных температур заготовки выталкиваются на лоток 5. Перемеще-



ние заготовок некруглого сечения внутри пространства печей, осуществляется за счет перемещения подвижного пода.

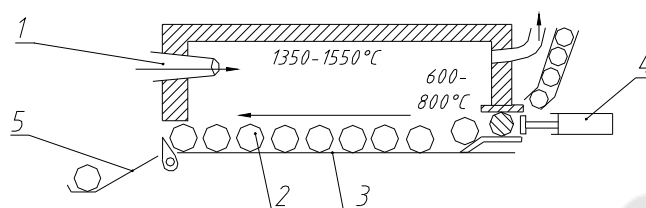


Рис. 4.7. Схема методической нагревательной печи

Методические и камерные печи оборудуют рекуператорами или регенераторами - теплообменными аппаратами. В рекуператорах происходит непрерывное встречное движение отходящих печных газов и воздуха, разделенных друг от друга стенкой - перегородкой. В регенераторах печные газы выводятся через систему каналов, нагревая их стенки. После нагрева поток газов переключают на охлажденный канал, а через нагретый подают воздух в рабочее пространство печи. Холодный воздух подогревается до температуры 300-800 °С, что обеспечивает экономию топлива за счет повышения степени его сгорания. КПД печи достигает 40 %, в то время как использование печи без подогрева воздуха позволяет получить КПД не более 10 %.

В *электронагревательных устройствах* теплота выделяется непосредственно в заготовке. В промышленности используются установки контактного нагрева сопротивлением и индукционного нагрева. *Электроконтактный нагрев* обеспечивается за счет превращения электрической энергии в тепловую в теле заготовки. При данном методе нагрева в наименьшей степени происходит окисление поверхности. Однако он не может быть применен для крупных заготовок из-за высокой энергетической нагрузки. Им нагревают обычно цилиндрические заготовки диаметром от 15 до 75 мм. Заготовка 1 закрепляется между двумя медными водоохлаждаемыми контактами 2 установки и по ней пропускается ток (рис. 4.8а).

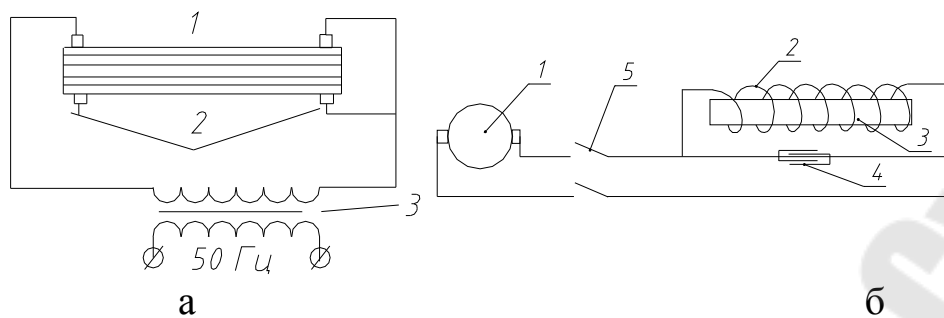


Рис. 4.8. Схемы электроконтактного (а) и индукционного (б) нагрева заготовок

При **индукционном нагреве** заготовка 3 помещается внутрь спиралевидного индуктора 2 (рис. 4.8б), по которому пропускается ток высокой частоты (100...160 кГц). Разогрев заготовки производится за счет вихревых токов, возникающих в поверхностных слоях заготовки. За несколько секунд поверхность разогревается до 1000...1200°C. Нагрев сердцевины осуществляется за счет теплопередачи от поверхности внутрь. Достоинство метода состоит в быстром нагреве, меньшем окислении поверхности заготовки, возможности автоматизации процесса. Однако метод позволяет нагревать только осесимметричные детали ограниченного диаметра (до 25 мм). Наиболее широко используется для нагрева прутковых заготовок на операциях горячей высадки болтов, гаек и других мелких изделий осесимметричной формы.

В электронагревательных установках скорость нагрева заготовок в 8...10 раз выше, а угар металла в 4...5 раз меньше, чем при печном нагреве. Отсутствие окалины на заготовках уменьшает износ штампов и позволяет повысить точность поковок.

#### 4.3. Основные типы оборудования для обработки давлением

В зависимости от характера воздействия рабочих частей машин на деформируемую заготовку машины для обработки металлов давлением можно свести к нескольким типам, рассмотренным ниже (рис. 4.9).

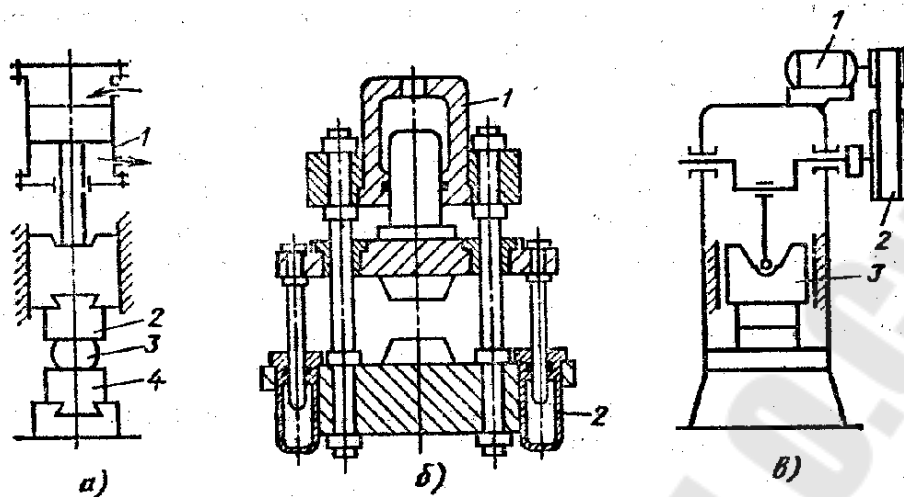


Рис. 4.9. Конструктивные схемы машин для обработки металлов давлением

**Молоты** представляют собой машины ударного действия со скоростью деформирования до 9 м/с (рис. 4.9а). Заготовка 3, расположенная между верхним 2 и нижним 4 бойками или пуансоном и матрицей деформируется за счет энергии пара или воздуха. Сжатый пар или воздух подается в нижнюю полость рабочего цилиндра 1 для подъема рабочих (падающих) частей молота вверх, а затем в верхнюю полость для нанесения удара верхним бойком по заготовке.

**Гидравлические прессы** являются машинами статического действия и обеспечивают скорость деформирования до 0,5 м/с (рис. 4.9б). Необходимое усилие деформирования создается за счет рабочей жидкости, поочередно поступающей под давлением до 20...30 МПа в рабочий 1 и возвратный 2 цилиндры прессы для опускания и подъема его рабочих частей.

**Механические прессы** (рис. 4.9в) являются также машинами статического действия со скоростью деформирования до 0,5 м/с. Деформирование заготовки происходит за счет энергии, накапливаемой массивным маховиком 2, приводимым в движение электродвигателем 1. Превращение вращательного движения маховика в возвратно-поступательное ползуна 3 обеспечивается кривошипно-шатунным механизмом, связанным с маховиком посредством муфты включения.

**Ротационные машины** деформируют заготовку вращающимся инструментом (например, прокатные станы).

В зависимости от технологического назначения оборудование имеет свои характерные конструктивные особенности. Оборудование оснащается различными средствами механизации и автоматизации,

программным управлением. Применяются роботизированные технологические комплексы, штамповочные центры, прессы-автоматы и др.

#### 4.4. Классификация процессов обработки металлов давлением

*Основными схемами деформирования объемной заготовки* считаются следующие: сжатие между плоскостями инструмента, ротационное обжатие вращающимися валками, затягивание металла в полость инструмента, выдавливание металла из полости инструмента и волочение. *Процессы деформирования листовой заготовки* объединяются в две группы: *разделительные операции* (отрезка, вырубка, пробивка) и *формоизменяющие* (гибка, вытяжка, формовка и др.).

*Ротационное обжатие вращающимися валками* обуславливается силами трения, действующими между инструментом и заготовкой, благодаря чему заготовка перемещается в зазоре между валками, одновременно деформируясь. Эта схема лежит в основе прокатки, раскатки и др. процессов (рис. 4.10а).

*Волочение* (рис.4.10б) заключается в протягивании заготовки через сужающееся отверстие в инструменте, называемом *волокой*. В данном процессе реализуется схема двустороннего сжатия с односторонним растяжением.

*Выдавливание металла через отверстие заданного сечения в матрице* (рис.4.10в) реализуется при неравномерном всестороннем сжатию металла в замкнутой полости, образуемой контейнером, матрицей и пуансоном .

*Сжатие между плоскостями инструмента* (рис. 4.10г) характеризуется свободным пластическим течением металла между поверхностями инструмента. Эта схема лежит в основе операцийковки: осадки, протяжки, раскатки и др. Схема напряженного состояния – всестороннее неравномерное сжатие из-за наличия сил трения на контакте инструмент – заготовка.

Пластическое затекание металла в полость инструмента лежит в основе *объемной штамповки* (рис. 4.10д). Металл заготовки заполняет полость специального инструмента – штампа, называемую ручьем, приобретая его форму и размеры.

Пример *листовой штамповки* приведен на рисунке 4.10е.

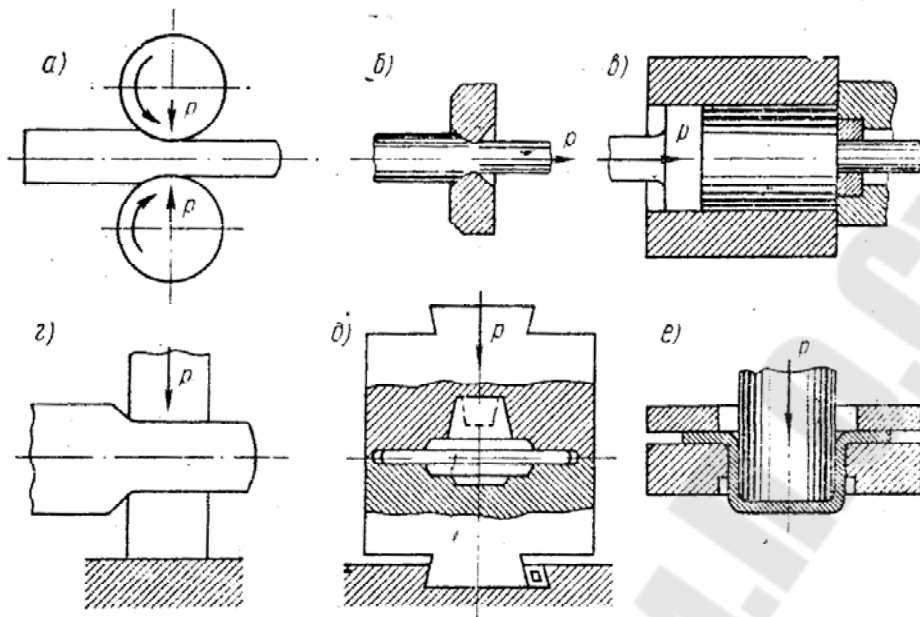


Рис. 4.10. Основные схемы обработки металлов давлением

#### 4.5/ Прокатка

**Прокаткой** называется процесс обжатия заготовки между вращающимися валками прокатного стана. Более 75 % литых сталей, цветных металлов и сплавов обрабатываются этим методом. Различают продольную, поперечную и поперечно-винтовую (косую) прокатку (рис. 4.11).

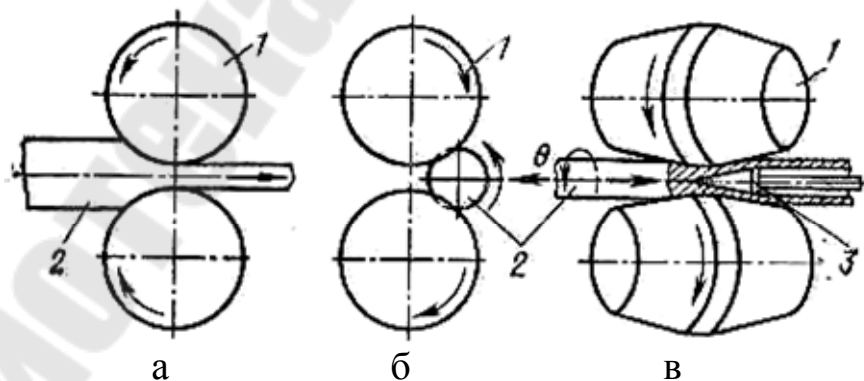


Рис. 4.11. Основные виды прокатки:

а – продольная; б – поперечная; в – поперечно-винтовая;  
1 – валки; 2 – заготовка; 3 - оправка

При *продольной* – металл обжимается между вращающимися навстречу друг другу валками и перемещается перпендикулярно их оси с уменьшением площади поперечного сечения заготовки и увеличением ее длины. Это самый распространенный вид прокатки. *Поперечная* прокатка осуществляется между валками с параллельными осями, вращающимися в одном направлении. Обработываемая заготовка получает вращательное движение в направлении, противоположном вращению валков, и деформируется вдоль валков. При *поперечно-винтовой* прокатке бочкообразные валки, расположенные под углом друг к другу и вращающиеся в одном направлении, придают заготовке одновременно вращательное и поступательное движения, втягивая ее в зазор между валками. В промышленности 90 % проката производится продольной прокаткой.

Процесс деформирования характеризуется *очагом деформации* и *коэффициентом деформации*. Объем металла, находящийся в каждый момент между валками, называется очагом деформации. Очаг деформации характеризуется дугой *AB* и углом захвата  $\alpha$  (рис. 4.12).

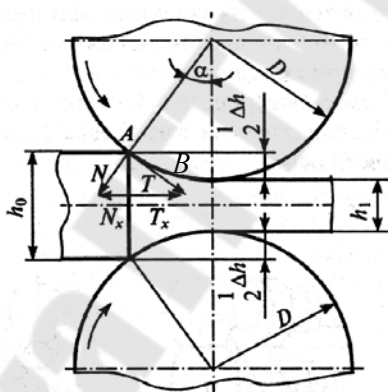


Рис. 4.12. Схема очага деформации при продольной прокатке

Для осуществления процесса деформирования необходима определенная величина сил трения. Так как система симметрична, то для одного валка условия захвата металла можно записать следующим образом

$$T \cdot \cos \alpha > N \cdot \sin \alpha,$$

где  $N$  – сила реакции от сжатия металла валками,  $T$  – сила трения между валками и заготовкой.

Так как сила трения  $T = fN$ , где  $f$  – коэффициент трения, то получим условие захвата

$$f > \operatorname{tg} \alpha, \quad \text{т.е.} \quad \alpha < \operatorname{arctg}(f)$$

При обработке давлением обеспечивается формоизменение заготовки без изменения ее объема и происходит в направлении, в котором имеется наименьшее сопротивление деформации. В данном процессе уменьшается толщина заготовки при одновременном увеличении ее длины и ширины. Изменение высоты ( $\Delta h = h_0 - h_1$ ), ширины ( $\Delta b = b_0 - b_1$ ) и длины заготовки ( $\Delta l = l_0 - l_1$ ) после деформации (с индексом 1) называют абсолютным обжатием, уширением и вытяжкой, соответственно. Для характеристики процесса используют коэффициенты обжатия ( $\lambda = h_0/h_1$ ), уширения ( $\beta = b_1/b_0$ ) и вытяжки ( $\mu = l_1/l_0$ ). Вытяжка за проход обычно составляет 1,1...1,6.

**Производством прокатного производства** являются машиностроительные профили, под которыми понимаются длинномерные изделия (у которых длина значительно больше поперечного сечения) с определенной формой поперечного сечения. Форма поперечного сечения может быть постоянной и переменной. Профиль с определенной формой и геометрическими размерами называется *сортом*. Совокупность получаемых изделий по форме, сечению и размерам называется *сортаментом*. Весь сортамент выпускаемых машиностроительных профилей можно разделить на четыре основные группы: сортовые профили, листовой металл, трубы и периодические профили.

*Сортовые профили* подразделяют на профили простой геометрической формы (квадрат, круг, шестигранник, прямоугольник) и фасонные (рельс, швеллер, тавр, двутавр, уголок и др.).

*Листовой прокат* выпускается с толщиной листа до 160 мм и делят на две основные группы: толстолистовой – толщиной от 4 до 160 мм при ширине листа от 600 до 5000 мм и тонколистовой – толщиной 0,2...3,9 мм при ширине от 600 до 2300 мм. Листы тоньше 0,2 мм называются *фольгой*.

*Трубы* выпускаются сварные и бесшовные. Бесшовные трубы применяют в наиболее ответственных случаях (при работе в агрессивных средах при высоких давлениях и др.).

*Периодические профили* имеют периодически изменяющуюся форму и площадь поперечного сечения вдоль оси заготовки. Эти профили используют в основном в качестве заготовок для последующей штамповки или окончательной механической обработки.

## Оборудование для прокатки

**Инструментом для прокатки** являются валки. В зависимости от прокатываемого профиля валки могут быть гладкими (для прокатки ленты, листа и др.), ступенчатыми (для получения полосы) и ручьевыми (для получения сортового проката). *Ручьем* называется вырез определенной формы на рабочей поверхности валка. Совокупность пары ручьевых валков образует полость, называемую *калибром*. Каждая пара ручьевых валков образует обычно несколько калибров. Калибры могут быть открытыми и закрытыми (рис. 4.13). Валки состоят из рабочей части – бочки 1, шеек 2 и трещ 3. Шейки валков вращаются в подшипниках.

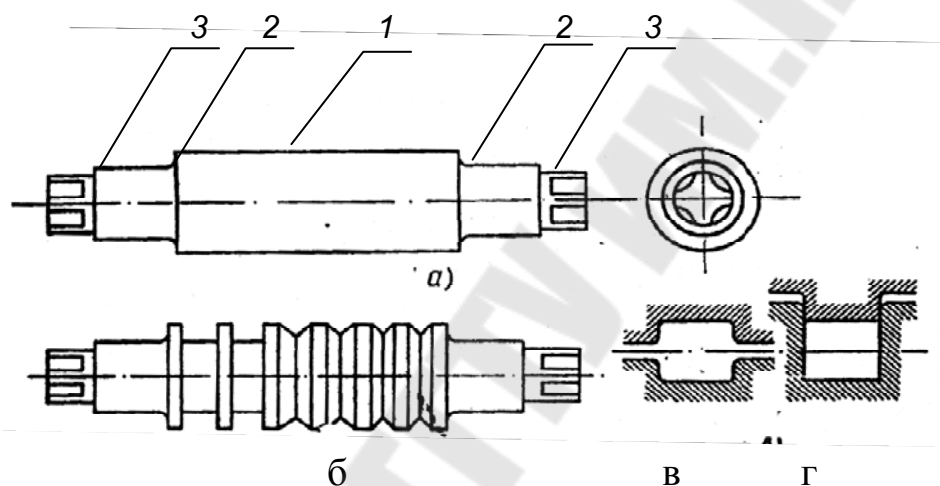


Рис. 4.13. Прокатные валки и типы калибров:  
а – гладкий валок; б – ручьевой валок;  
в – открытый калибр; г – закрытый калибр

Комплект рабочих валков со станиной называются *рабочей клетью*. В клетях для регулирования расстояния между валками и взаимного расположения осей предусматривается специальный нажимной механизм. Верхний валок может перемещаться в вертикальной плоскости, что позволяет регулировать зазор между валками. По количеству валков и их расположению рабочие клетки подразделяются на: двухвалковые (дуо), трехвалковые (трио), четырехвалковые (кварто), 6 и 12 валковые. Трио клетки используются редко. Во всех остальных клетях рабочими являются только два валка, остальные валки опорные (рис. 4.14). Благодаря им уменьшаются размеры рабочих валков, увеличивается степень вытяжки и уменьшаются деформирующие усилия.



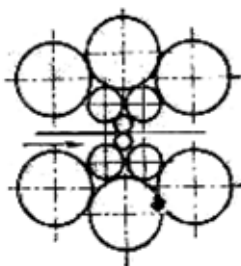


Рис. 4.14. Схема расположения валков в 12-валковой клетке

Рабочая клетка является основным рабочим органом *прокатного стана* (рис.3.15), обеспечивающим выпуск необходимого профиля и его точность. Рабочая клетка 1 вместе со шпинделями 3, приводящими в движение валки 2, шестеренной клетью 4, служащей для передачи вращения от одного вала на два, редуктором 6, электродвигателем 8 и муфтами 5 и 7 образуют рабочую линию стана. Станы могут быть *реверсивными и неревверсивными*.

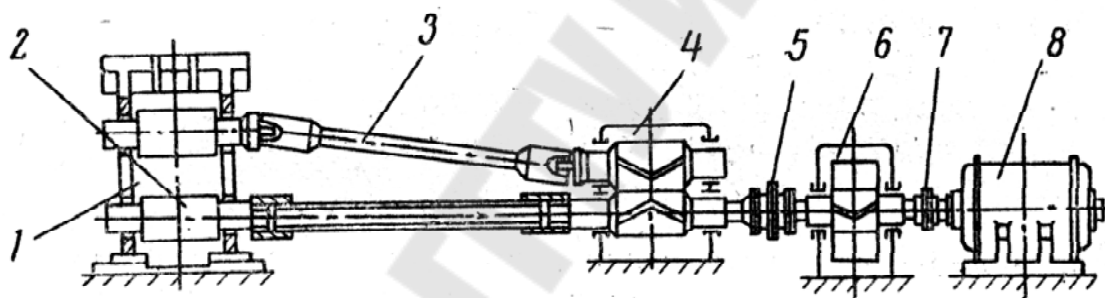


Рис. 4.15. Основные узлы прокатного стана

Прокатные станы классифицируют по числу и расположению валков в клетях, по числу и расположению клетей и по назначению. Дуо станы используют для получения сортового проката, проволоки, арматуры, толстого листа. Как правило, применяются многоручьевые валки, в которых заготовка поочередно деформируется при каждом проходе. Эти станы выполняют реверсивными. Станы «кварто» и многовалковые применяют для горячей прокатки тонкого листового проката и фольги. В универсальных станах используют две пары рабочих валков, оси которых взаимно перпендикулярны (рис. 4.16). Регулируя зазоры между валками, получают заданный сортament (прямоугольный, тавровый, двутавровый).

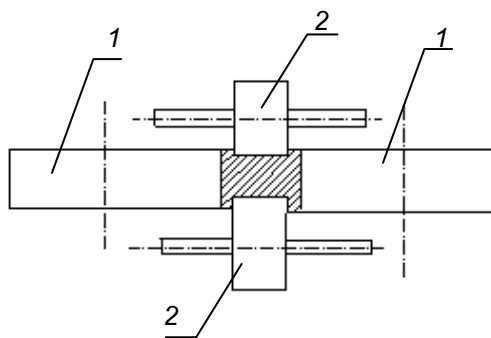


Рис. 4.16. Схема расположения валков в универсальных станах:  
 1 – валки, вращающиеся в горизонтальной плоскости;  
 2 – валки, вращающиеся в вертикальной плоскости.

**По числу рабочих клеток** станы подразделяют на одноклетевые и многоклетевые. Расположение клеток может быть линейным в 1, 2 и более линий, последовательным, шахматным, непрерывным, полунепрерывным. Наиболее совершенны многоклетевые непрерывные станы, с последовательно расположенными клетями, через которые заготовки проходят также один раз. Клетки располагаются на расстояниях меньше длины заготовки, что обеспечивает их прокатку одновременно в нескольких клетях и, соответственно, высокую производительность станов.

**По назначению** прокатные станы подразделяются на станы, производящие заготовки для переработки их в готовый прокат, и производящие готовые изделия. К первой группе относятся обжимные станы для прокатки слитков в полупродукт крупного сечения – блюмов и слябов. *Блюмы* – для производства заготовок квадратного сечения, служащих для изготовления сортового проката, труб и специального проката. *Слябы* – для производства заготовок прямоугольного сечения, предназначенных для прокатки толстолистного проката. Соответственно, станы называются *блюминговыми* и *слябинговыми*. К этой группе относятся также *заготовочные станы*, служащие для получения полупродукта более мелкого сечения. *К станам для производства готового проката* относятся: *сортовые, листовые, трубные и специальные*. Размеры блюмингов, слябингов, заготовочных и сортовых станов характеризуются диаметром бочки валков, например, блюминг 1500, сортовой стан 350. Листовые станы характеризуют длиной бочки, например, стан 3600, а трубные – диаметром прокатываемых труб.

Исходной заготовкой при прокатке служат слитки: стальные массой до 60т, из цветных металлов обычно до 10 т. При производст-

ве сортовых профилей стальной слиток массой до 15 т в горячем состоянии прокатывают на блюмингах, получая заготовки квадратного сечения размером от 140×140 мм до 450×450 мм. Затем блюмы поступают на заготовочные станы для прокатки заготовок требуемых размеров. На заготовочных и сортовых станах заготовки проходят через ряд калибров, число которых зависит от разности поперечных сечений заготовки и конечного изделия и от сложности его профиля. После прокатки сортамент режут на мерные длины, охлаждают, правят в холодном состоянии, термически обрабатывают, удаляют поверхностные дефекты.

При производстве листового проката стальной слиток массой до 50 т в горячем состоянии прокатывают на слябинге, получая заготовку прямоугольного сечения. Слябы прокатывают на непрерывных станах горячей прокатки, состоящих из двух групп рабочих клетей, расположенных друг за другом: черновой и чистовой. Перед каждой группой клетей сбивают окалину в окалиноломателях. После прокатки полосу толщиной 1,2...16 мм сматывают в рулоны. К отделочным операциям горячекатаного листа относятся: резка, травление, термообработка и др.

Лист толщиной менее 1,5 мм получают из горячекатаных рулонов на станах холодной прокатки. Предварительно лист травят в кислотах с последующей промывкой. После прокатки производят отжиг в защитных газах, резку на мерные листы и др. отделочные операции.

### ***Получение бесшовных труб***

В качестве заготовок для получения бесшовных труб используют круглые и граненые слитки, а также заготовки катанные. Технологический процесс состоит из 5 этапов. На первом этапе осуществляется прошивка отверстия в заготовке на прошивном стане, реализующем принцип поперечно-винтовой прокатки. Оси бочкообразных валков 1 располагаются под углом 5...15° друг к другу и вращаются в одном направлении. Заготовка 2 получает одновременно вращательное и поступательное движение. На пути движения заготовки устанавливается оправка 3, обеспечивающая прошивку отверстия (рис.4.17).

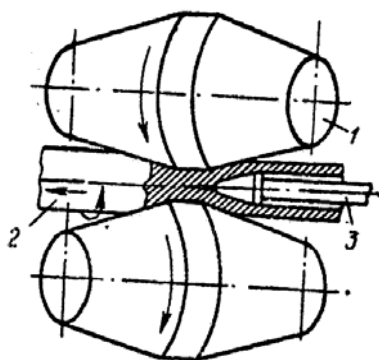


Рис. 4.17. Схема прошивки отверстия в заготовке

На втором этапе прошитая толстостенная заготовка раскатывается до требуемого диаметра и толщины стенки на автоматических или пиллигримовых (периодических) станах (рис. 4.18). При раскатке труб на автоматических станах прошитую гильзу перемещают между двумя валками с последовательно расположенными круглыми калибрами и оправкой. Зазор между калибрами и оправкой определяют толщину стенки трубы. Равномерность деформирования стенки обеспечивается поворотом заготовки на  $90^\circ$  после каждого прохода. При раскатке на пиллигримовых станах операция деформирования заготовки повторяется дважды при прямом и обратном ходе.

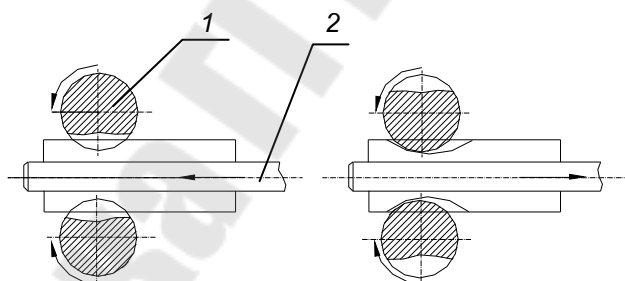


Рис. 4.18. Схема обработки заготовки на пиллигримовом стане:  
1 – валки; 2 - оправка

При прямом ходе в момент наибольшего зазора между валками, имеющими круглый калибр переменного сечения, гильза на оправке подается в валки навстречу их вращению. При обратном ходе происходит обжатие трубы с поворотом ее вокруг своей оси на  $90^\circ$ . Пилигримовые станы позволяют обеспечить вытяжку при раскатке до 10...14, а на автоматических станах она не превышает 4,5.

На третьем этапе производится калибровка толщины стенок на короткой неподвижной оправке. На четвертом этапе устраняется неравномерность толщины стенок по сечению, овальность и риски после раскатки. С этой целью заготовку обрабатывают на раскатных станах на длинной гладкой оправке (рис. 4.19).

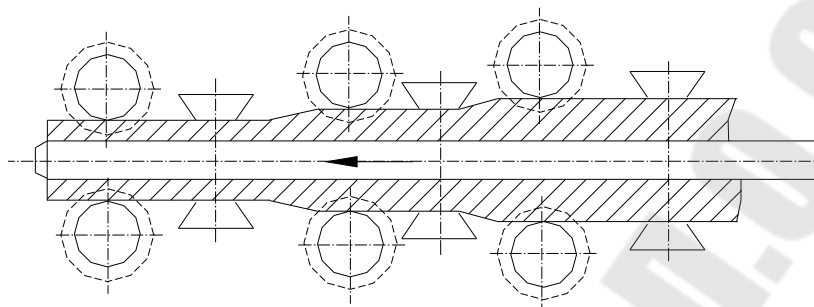


Рис. 4.19. Обработка трубы на раскатном стане на длинной оправке

На пятом этапе осуществляют калибровку формы трубы и получение заданного диаметра на калибровочном многоклетьевом стане продольной прокатки без оправки.

Бесшовные трубы выпускаются диаметром от 650 мм до нескольких миллиметров (для медицинских игл) с толщиной стенок от 75 мм до десятых долей миллиметра. Горячекатаные трубы изготавливают диаметром не менее 75 мм и толщиной стенки не менее 2,5 мм. Уменьшение диаметра горячекатаных труб до 540...25 мм производят методом горячего редуцирования (без утонения стенки) на редуциционных безоправочных станах. Получение труб повышенной геометрической точности и качества, в том числе тонкостенных и малого диаметра, осуществляется методом холодной прокатки и волочения.

### ***Производство сварных труб***

Сварные трубы изготавливают из плоской заготовки – ленты, называемой штрипсом, или из листов шириной, соответствующей длине окружности трубы. Процесс изготовления трубы включает следующие операции: гибку плоской заготовки в трубу, сварку кромок и калибровку. В зависимости от назначения свертывание трубы может быть прямошовным или винтовым (при использовании штрипсов). Прямошовные трубы изготавливают из листа или полосы, которую гнут в трубы на непрерывных формовочных станах в холодном состоянии (рис. 4.20). По сравнению с бесшовными сварные трубы имеют более тонкие стенки с меньшими отклонениями по толщине.

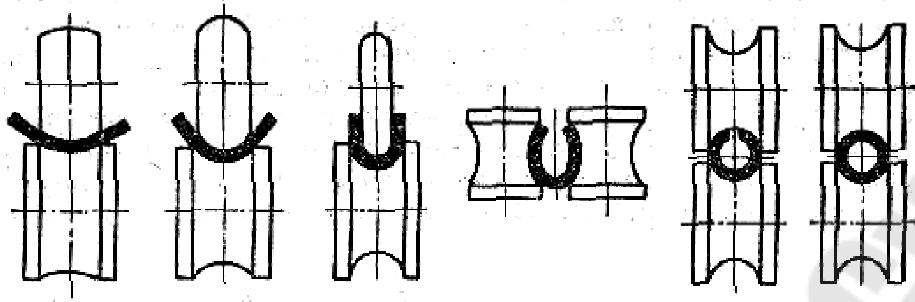


Рис. 4.20. Схема получения прямошовных труб

Сварку их производят на трубозлектросварочных станах, где кромки трубы прижимаются друг к другу двумя парами вертикальных валков и одновременно свариваются электроконтактной шовной сваркой сопротивлением или дуговой сваркой под флюсом (рис. 4.21).

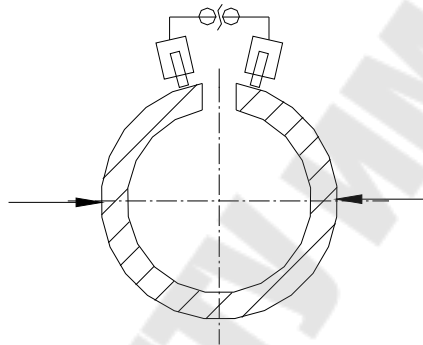


Рис. 4.21. Схема электроконтактной сварки труб

Швы могут накладываться в последнем случае как снаружи, так и изнутри (при больших размерах). При получении труб со спиральным швом металлическая полоса 1, разматываемая с рулона, сворачивается по спирали на оправке 2, а затем сваривается по кромкам (рис. 4.22). После сварки трубы калибруют,резают на мерные части. Электросваркой можно получать трубы диаметром до 2500 мм с тонкой стенкой до 0,5 мм из углеродистых и легированных сталей.

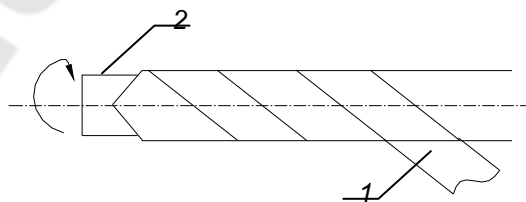


Рис. 4.22. Схема получения труб со спиральным швом

## Производство специальных видов проката

В машиностроении широко применяются осесимметричные детали круглого поперечного сечения, диаметр которых периодически изменяется по длине (полуоси автомобилей, ступенчатые валы, шаровые опоры и др.). Изготовление этих деталей методамиковки и штамповки по производительности, точности и качеству значительно уступают поперечно-винтовой прокатке. На рисунке 4.23 приведена схема получения шаров по этой технологии. Ручьи валков 2 выполняются по винтовой линии. Эта технология практически безотходна и обеспечивает получение шаров диаметром от 25 до 120 мм из прутка 1. За один оборот валков прокатывается 1 шар.

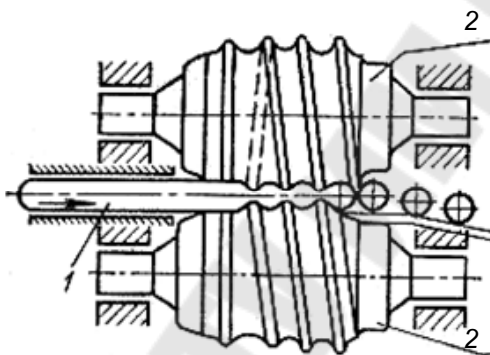


Рис. 4.23. Схема прокатки шаров

Для изготовления осесимметричных деталей используется *поперечно-клиновья прокатка*, в которой в качестве инструмента используются плиты с фасонной рабочей поверхностью. Поступательное движение одной плиты относительно другой приводит к прокатыванию заготовки в клиновидном зазоре между плитами, ее обжатию и заполнению металлом рабочих полостей (рис.4.24).

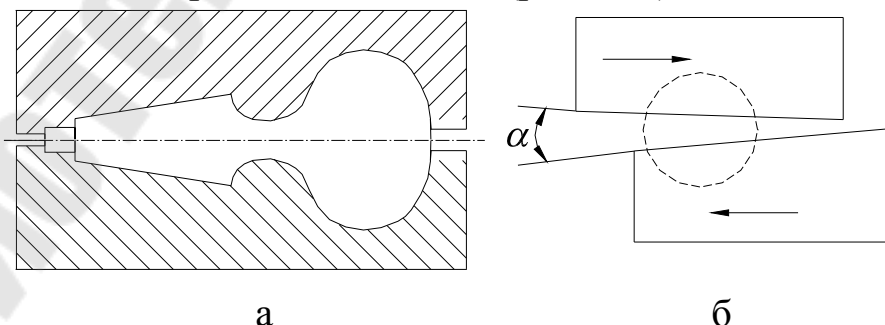


Рис. 4.24. Схема поперечно-клиновой прокатки:

а – форма поперечного сечения зазора между плитами,

б – схема движения деформирующих плит

## Производство гнутых профилей

Применение гнутых профилей вместо сварных позволяет экономить до 30 % металла. Гнутые профили изготавливают непрерывным способом на многоклетевых роliko-гибочных станах из листа, уголков, швеллеров и др. проката. Процесс профилирования листового материала ведется в холодном состоянии и заключается в постепенном изменении формы сечения плоской заготовки до требуемого профиля при последовательном прохождении полосы через несколько пар вращающихся фигурных роликoв (рис. 4.25). Площадь поперечного сечения исходной полосы практически не изменяется.

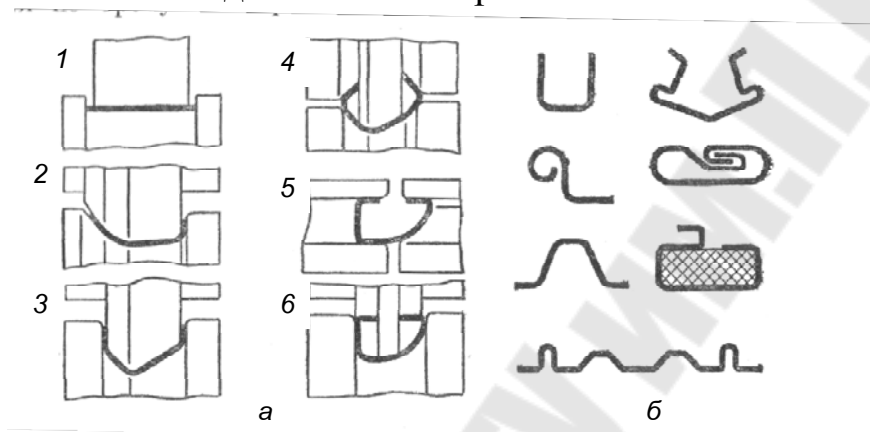


Рис. 4.25. Последовательность операций получения гнутого профиля (а) и примеры производимых профилей (б)

По сравнению с горячей прокаткой по данной технологии можно получить из полосовой стали профиль практически любой конфигурации, различного размера с высокой точностью и высоким качеством поверхности. Технология обеспечивает высокий коэффициент использования металла до 99,98 %. Метод позволяет использовать заготовки из стали и цветных металлов шириной до 2,5 м при толщинах от 0,3 до 10 мм. Форма гнутых профилей может быть открытого и закрытого типа, в том числе с наполнителем. При одинаковой прочности гнутые профили на 25...30 % легче горячекатаных.

#### 4.6. Волочение

**Волочение** – процесс обработки металлов давлением, при котором материал протягивается через отверстие инструмента – волоку (*фильеру*), площадь выходного сечения которой меньше площади сечения заготовки. Его производят через одну или несколько волок при обжатии за один проход не более 20...25 %. Суммарное обжатие мо-



жет достигать 40...85 %. Волочение, как правило, осуществляется в холодном состоянии. *Исходными материалами для волочения* являются горячекатаный сортовой прокат, проволока, трубы из стали и цветных металлов и сплавов. Волочение применяют для получения проволоки диаметром от 10 до 0,002 мм, тонкостенных труб диаметром менее 25 мм, фасонных профилей, а также калибровки изделий.

*Волока* имеет четыре зоны: входную 1, рабочую 2, калибрующую 3 и выходную 4 (рис. 4.26).

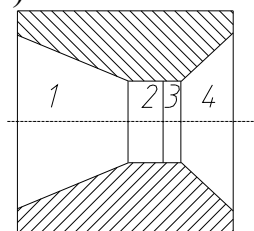


Рис. 4.26. Конструктивная схема волоки

Степень обжатия при волочении определяется по формуле:

$$\varepsilon = [(F_1 - F_2) / F_2 \cdot 100\% ,$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – площади поперечного сечения заготовки до и после волочения.

*Коэффициентом вытяжки* при волочении называют отношение:

$$\mu = F_1/F_2.$$

За один проход волочения его величина составляет 1,25...1,45, но может составлять до 1,8 при волочении труб на оправке.

Различают схемы волочения без оправки (а) и с оправкой (б) (рис. 4.27).

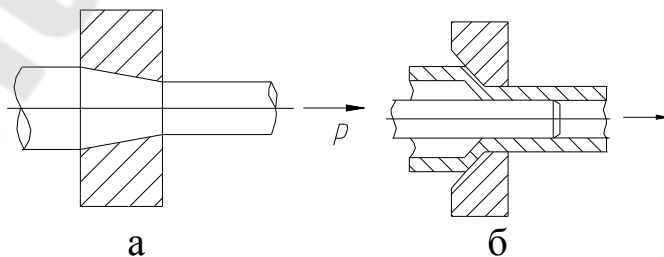


Рис. 4.27. Схемы волочения без оправки (а) и с оправкой (б)

По первой схеме осуществляется волочение прутковых материалов, проволоки и труб, по второй – трубчатых заготовок. Волочение производится на специальных станах. В зависимости от конструкции они подразделяются на барабанные, цепные и гидравлические.

**Барабанные станы** в основном используются для волочения проволоки. Схема стана приведена на рисунке 4.28. Бунт проволоки 1 одевается на холостой барабан 2. Предварительно заостренный конец проволоки пропускается через отверстие волоки 3 и закрепляется на приемном барабане 4, который приводится во вращение от электродвигателя через редуктор и коническую зубчатую передачу 5. Станы многократного волочения имеют несколько тяговых барабанов с установленными перед ними волоками соответствующего сечения. В станах однократного волочения скорость перемещения проволоки составляет около 1 м/с, диаметр исходной проволоки от 0,4 до 20 мм. Скорость волочения в многократных станах достигает от 0,3 до 50 м/с, диаметр исходной проволоки от 0,6 до 2 мм.

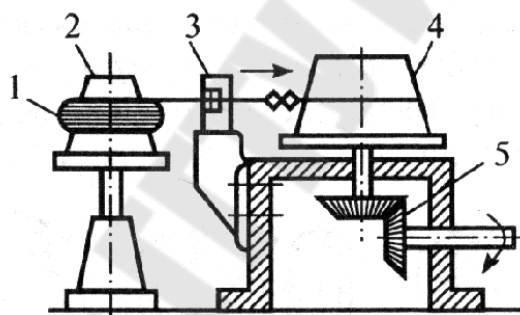


Рис. 4.28. Схема волочильного барабанного стана

**Цепные и гидравлические станы** предназначены преимущественно для волочения прутков и профилей конечной длины (до 25...50 м) со скоростью волочения от 0,5 до 10 м/с. Тянущим устройством у цепных станов является каретка на цепном или гидравлическом приводе 5 (рис. 4.29.). Конец прутка пропускают через отверстие волоки 3 и захватывают клещами, которые закреплены на каретке 5. Каретка, соединенная с цепью 7 посредством крюка 6, перемещается с помощью электродвигателя 8. Сортамент изделий, изготавливаемых волочением, очень разнообразен: проволока диаметром от 2 мкм до 5 мм, фасонные профили. Волочением калибруют стальные трубы диаметром от капиллярных до 200 мм, стальные прутки диаметром от 3 до 150 мм. Скорость волочения на цепных станах достигает до 10...20 м/мин.

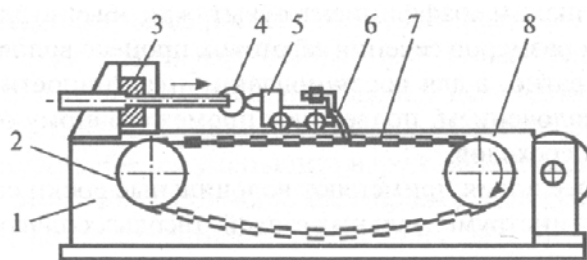


Рис. 4.29. Схема цепного волочильного стана

Профиль продукции обеспечивается формой волоки, изготавливаемой из инструментальных сталей типа Х12М или твердых сплавов ВК2, ВК3, а для получения тонкой проволоки диаметром менее 0,3 мм – из алмаза. Изделия из пластичных металлов волочат при комнатной температуре с промежуточным отжигом для снятия наклепа. Хрупкие металлы W, Mo и др. обрабатывают в горячем состоянии в защитной атмосфере или в вакууме. Для снижения усилия волочения (на 25...30 %) используют наложение в зону волочения ультразвуковых колебаний.

#### 4.7. Прессование

**Прессованием** называется технологический процесс обработки металлов давлением, заключающийся в выдавливании металла пуансоном из закрытого контейнера через отверстие в матрице, площадь поперечного сечения которого меньше чем у заготовки. Профиль изделия определяется профилем отверстия в матрице. Прессованием изготавливают изделия разнообразного сортамента, в том числе прутки диаметром 3...300 мм, трубы диаметром 18...400 мм и толщиной стенки 1,5...12 мм и др. профили, которые невозможно получить другими способами ОМД. Продукция отличается высокой точностью. Прессованием получают изделия из алюминия, титана, магния, цинка и их сплавов, углеродистых и легированных сталей.

При прессовании металл подвергается неравномерному всестороннему сжатию и поэтому имеет весьма высокую пластичность. Коэффициент вытяжки при прессовании, определяемый как отношение площади сечения заготовки к площади сечения прессуемого профиля, может достигать 10...50. Различают прямую и обратную схемы прессования. При *прямой схеме* (рис. 4.30а) – направление движения металла *1* и пуансона *3* совпадают, при *обратном прессовании* (рис. 4.30б) – металл движется в направлении противоположном движению пуансона. При обратном методе усилие прессования на

25...30 % ниже, т.к. отсутствует трение металла о стенки контейнера 2, однако больше пресс-остаток. При изготовлении полого профиля к торцу пресс-шайбы 3 крепится игла 2 (рис. 4.30в). Металл выдавливается в кольцевой зазор между иглой и отверстием матрицы 5. В этом случае заготовки используются в виде втулок. Прессованием изготавливают детали из черных и цветных металлов. Черные металлы перерабатывают в горячем и холодном состоянии, а цветные – преимущественно в холодном.

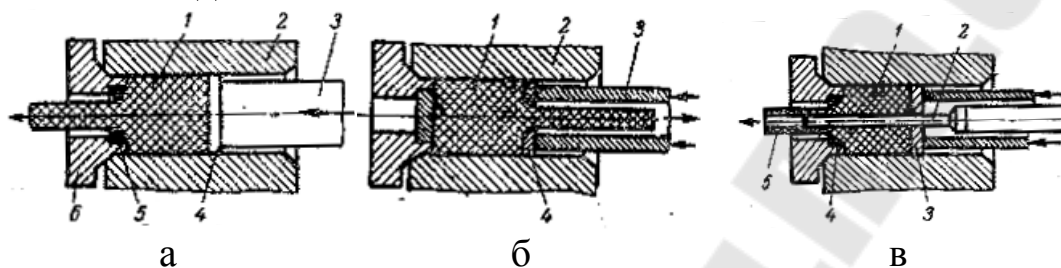


Рис. 4.30. Схемы прессования: а – прямого; б – обратного; в – изготовления полого профиля

Прессование осуществляется на гидравлических прессах, развивающих усилие 15...300 МН. Матрицы изготавливают из легированных сталей 3Х2В8, 38ХМЮА и др. и твердых сплавов. Имеются методы гидропрессования (жидкостью высокого давления) и взрывом, позволяющие обработку малопластичных материалов.

Недостатками процесса прессования являются повышенные требования к подготовке заготовок, значительные потери металла на отходы, неравномерность механических свойств по длине и сечению изделия.

#### 4.8. Ковка

**Ковкой** называется горячая обработка металлов давлением, при которой металл деформируется в результате многократного прерывистого воздействия инструментом до получения заданной формы и размеров. Различают *ковку в штампах (штамповка)* и *без применения штампов – свободную ковку*. При свободной ковке металл свободно вытесняется в стороны не ограниченные рабочими поверхностями инструмента. Инструментом могут быть плоские или фигурные бойки. В качестве дополнительных приспособлений используют прошивки, топоры, клейма, оправки и другие подкладные устройства. Методом свободной ковки можно получать поковки массой до 250 т типа

валов гидрогенераторов, турбинных дисков, коленчатых валов судовых двигателей и т.д. Свободная ковка экономически целесообразна в мелкосерийном производстве, т.к. используется универсальный инструмент.

Ковку подразделяют на ручную и машинную. *Ручную ковку* ведут молотом на наковальне и применяют для индивидуального изготовления мелких изделий и при ремонтных работах. *Механическую ковку* ведут на ковочных молотах и прессах. Молоты используют для изготовления изделий средних размеров, пресса – для крупногабаритных. Наибольшее распространение получили паровоздушные, пневматические, механические молоты и гидравлические пресса. Все типы молотов и прессов имеют подвижные части (верхний боек, баба) и неподвижные части (нижний боек, шабот). При свободной ковке используется различный кузнечный инструмент: бойки, обжимки, наметки, раскатки, топоры, прошивки. К основным операциям ковки относятся: осадка, высадка, протяжка, прошивка, отрубка, гибка.

**Осадка** – операция, заключающаяся в уменьшении высоты заготовки при увеличении ее площади поперечного сечения практически по всей высоте заготовки (рис. 4.31а). Осадку заготовок производят между бойками или подкладными плитами. Осадку применяют также для динамического удаления окалины. Рекомендуется производить осадку заготовок при отношении высоты ее к диаметру не более 2,5, т.к. при больших отношениях возможна потеря устойчивости заготовки. Разновидностью осадки является **высадка**, при которой металл осаживается лишь на части длины заготовки (рис. 4.31б).

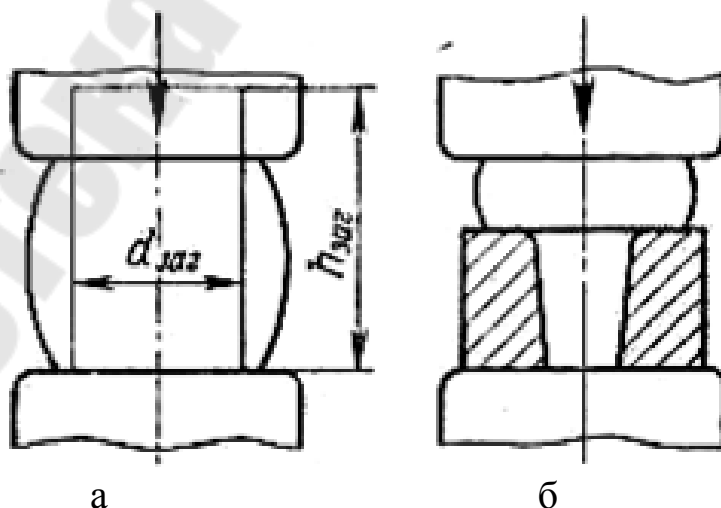


Рис. 4.31. Схемы операций осадки (а) и высадки (б)

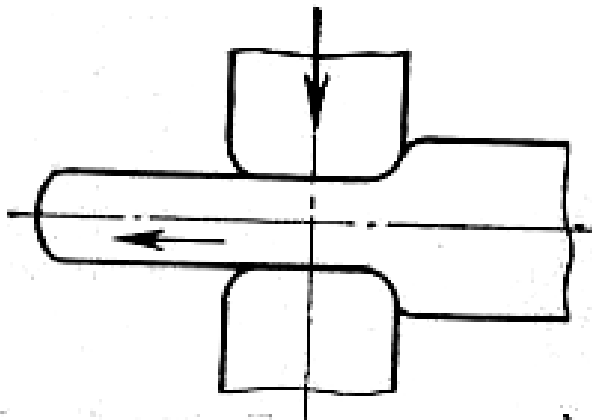


Рис. 4.32. Схема выполнения плоской протяжки заготовки

**Протяжка** – операция удлинения заготовки или ее части за счет уменьшения площади поперечного сечения. Протяжка осуществляется последовательными ударами или нажатиями на отдельные участки заготовки, примыкающие один к другому, с подачей заготовки вдоль оси протяжки. При каждом нажатии уменьшается высота

сечения, увеличивается ширина и длина заготовки. Протяжка выполняется плоскими или вырезными бойками (рис.4.32а).

Протяжка имеет ряд разновидностей, которые рассмотрим ниже. **Разгонка** – операция, при которой увеличивается ширина части заготовки за счет уменьшения ее толщины. **Протяжка с оправкой** – операция, заключающаяся в увеличении длины пустотелой заготовки за счет уменьшения толщины стенки. Операцию выполняют на оправке 1 между двумя вырезными бойками или одним вырезным 3 и одним плоским 2. Заготовку периодически поворачивают вокруг оси (рис.4.33а). **Раскатка на оправке** – операция одновременного увеличения наружного и внутреннего диаметров кольцевой заготовки 5 за счет уменьшения толщины ее стенок (рис. 4.33б). После каждого удара бойка 4 заготовку поворачивают на оправке 6 вокруг своей оси. Оправка свободно опирается на две опоры.

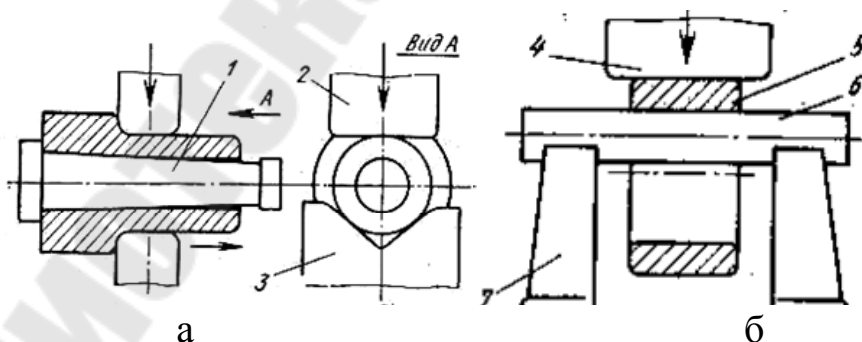


Рис. 4.33. Схема протяжки (а) и раскатки (б) заготовки на оправке

**Прошивка** – операция получения полостей в заготовке за счет вытеснения металла специальными прошивнями. Прошивкой выполняются как сквозные отверстия, так и углубления (глухая прошивка). Диаметр прошивня выбирается не более  $1/2 \dots 1/3$  наружного диаметра заготовки.

**Гибка** – операция придания заготовке изогнутой формы по заданному контуру (рис 4.34а). Гибка производится с помощью различных опорных элементов и приспособлений.

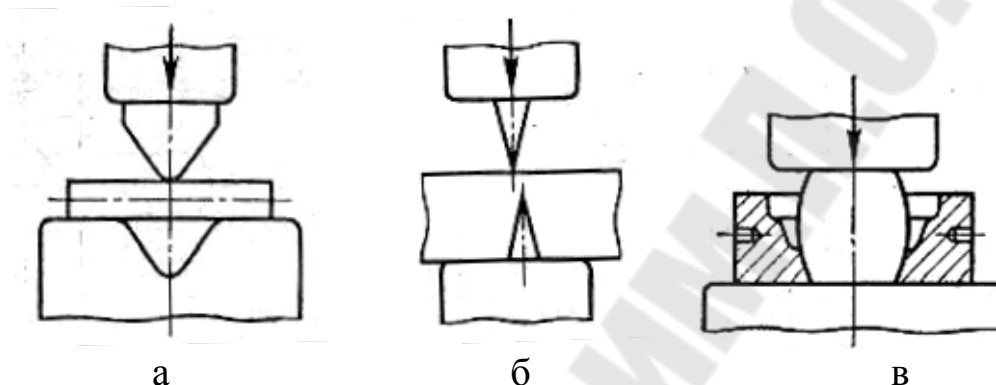


Рис. 4.34. Схемы операцийковки: а – гибка; б – отрубка; в – штамповка в подкладных штампах

**Отрубка** – операция отделения части заготовки по незамкнутому контуру путем внедрения в заготовку деформирующего инструмента – топора (рис. 4.34б). Отрубку применяют для разделения заготовки на части, удаления излишков металла на концах поковок, прибыльной части слитков и др. Поковки сложной конфигурации изготавливают путем штамповки в подкладных штампах (рис. 4.34в).

### **Чертеж поковки**

Чертеж поковки составляется на основе чертежа детали с учетом припусков, допусков и напусков (рис. 4.35). *Припуском* называется поверхностный слой металла поковки 1, подлежащий удалению обработкой резанием для получения требуемых размеров и качества поверхности детали. Припуски назначаются в местах, подлежащих обработке резанием. *Допуск* – это допустимое отклонение от номинального размера поковки. *Напуск* – объем металла, добавляемого к поковке сверх припуска 2, с целью упрощения ее формы и процессаковки. По чертежу поковки определяют массу заготовки с учетом массы отходов и массы угара.

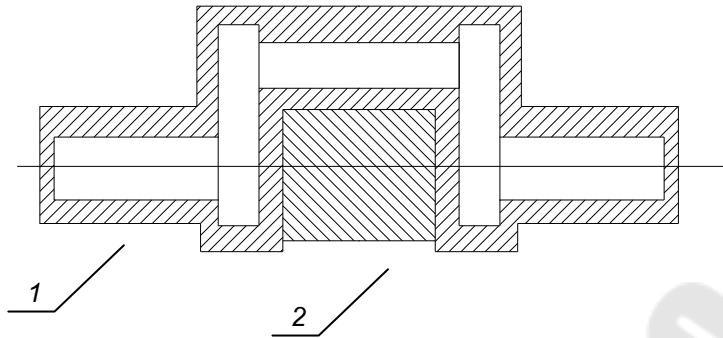


Рис. 4.35. Чертеж поковки, получаемой ковкой

### Оборудование дляковки

Ковку выполняют на ковочных молотах и ковочных гидравлических прессах. Продолжительность деформации на ковочных молотах составляет тысячные доли секунды. Металл деформируется за счет энергии подвижных (падающих) частей молота (бабы с бойком, штоком и поршнем).

Наиболее широко применяют паровоздушные молоты, приводимые в действие паром или сжатым воздухом давлением 0,7...0,9 МПа. По конструкции станины паровоздушные ковочные молоты бывают арочными, мостовыми и одностоечными. Масса падающих частей паровоздушных молотов составляет от 10000 до 8000 кг и изготавливают на них поковки массой от 20 до 350 кг.

Продолжительность деформации на гидравлических прессах составляет от единиц до десятков секунд. Металл деформируется приложением силы, создаваемой с помощью жидкости (минеральное масло, водные эмульсии), подаваемой в рабочий цилиндр пресса. Ковочные прессы изготавливают с усилием 5...100 МН.

### 4.9. Штамповка

**Штамповка** представляет собой процесс ОМД, формообразование изделий при котором происходит в штампах. Штамповка производится на прессах и молотах, которые отличаются от ковочных большей жесткостью и точностью направляющих подвижных частей. В зависимости от формы заготовки различают объемную и листовую штамповку. Штамповка бывает холодной и горячей. *Горячая объемная штамповка* применяется в основном для массового и серийного про-



изводства и позволяет получать изделия с высокой точностью формы и размеров. Метод позволяет обрабатывать трудно деформируемые металлы. *Холодная объемная штамповка* применяется в основном для деталей небольшого размера. При этом уменьшаются отходы металла, улучшается качество поверхностей, обеспечивается высокая точность изделий при высокой производительности труда. *Листовая штамповка* применяется для изготовления плоских или пространственных тонкостенных изделий из стали, цветных металлов и сплавов. При холодной штамповке используют листовые заготовки толщиной от сотых долей миллиметра до 4 мм. При толщине более 4 мм используют горячую штамповку. *Операции листовой штамповки* подразделяют на разделительные (отрезка, вырубка, пробивка и др.) и формоизменяющие (гибка, вытяжка, формовка, отбортовка и др.).

### ***Горячая объемная штамповка***

При горячей штамповке деформация металла, нагретого до определенной температуры, в штампе ограничивается поверхностями полостей и выступов, образующих единую замкнутую полость (ручей) по конфигурации поковки. В качестве заготовок используют прокат круглого, прямоугольного или квадратного сечения. Горячая объемная штамповка позволяет получать изделия без напусков, что невозможно при ковке. Значительно выше точность и меньше допуски, что сокращает объем последующей механической обработки. Обычно после штамповки обрабатывают только сопрягающиеся поверхности. Однако штампы – дорогостоящий инструмент и пригоден лишь для одной конкретной детали. Кроме того, при штамповке, требуются гораздо большие усилия деформирования, чем при ковке такой же поковки. Поэтому штампуют в основном поковки массой до 20...30 кг. Штамповка может быть осуществлена в *открытых и закрытых штампах* (рис. 4.36).

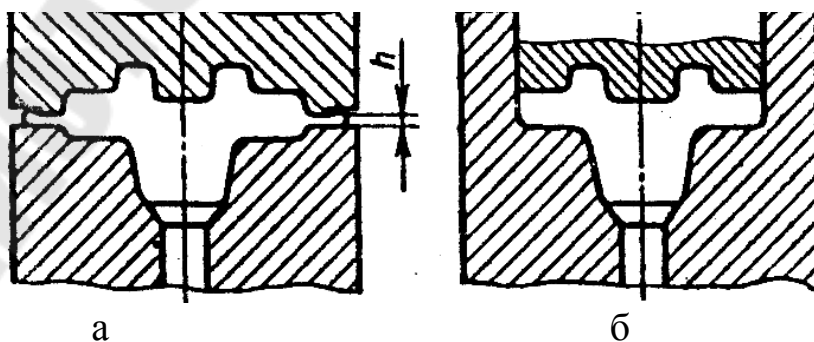


Рис. 4.36. Схема штамповки: а – в открытом штампе, б – в закрытом штампе

При штамповке в *открытых штампах* поковка получается с *облоем*, избытком материала, вытесненным на заключительной фазе процесса штамповки в облойную канавку. Облой затем обрезают на специальных штампах. Отходы в облой составляют до 10...20 % от массы поковки. Штамповка в *закрытых штампах* безоблойная. Открытые штампы имеют поверхность разъема в виде плоскости. Закрытые имеют разъем по сложной поверхности с направляющими, обеспечивающими точное совмещение половин штампа. Конструктивно и технологически они более сложные. При штамповке в закрытых штампах необходимо строго соблюдать равенство объемов поковки и заготовки. При недостатке металла будут не заполнены угловые части полости штампа, а при его избытке – размеры поковки по высоте будут больше требуемых. В закрытых штампах, как правило, изготавливают осесимметричные поковки 1 и 2 типов сложности, т.е. типа дисков и колес, а также колец, втулок. Общий технологический процесс горячей штамповки складывается из отрезки заготовок и зачистки заусенцев, термической обработки, правки и калибровки, отделки поверхности.

#### ***Чертеж поковки, получаемой штамповкой***

Чертеж поковки составляют по чертежу детали. При штамповке в открытом штампе прежде всего необходимо выбрать *поверхность разъема штампа*, т.е. поверхность, по которой соприкасаются верхняя и нижняя половины штампа. Обычно это плоскость или сочетание плоскостей. *Плоскость разъема* выбирается так, чтобы поковка свободно извлекалась из штампа, пересекала вертикальную поверхность поковки (рис. 4.37).

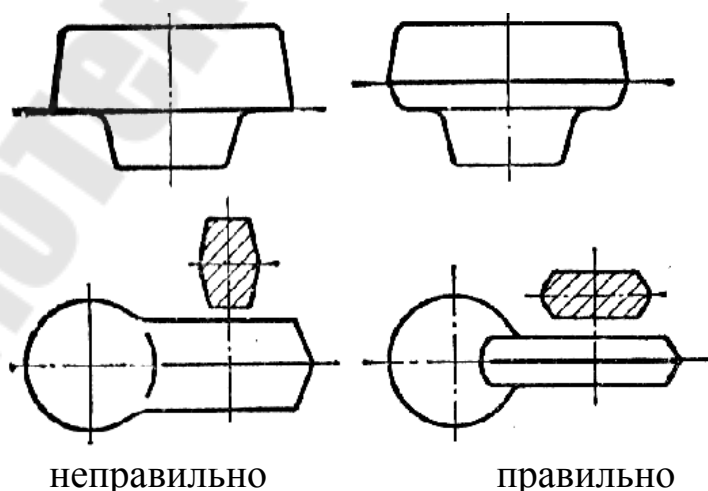


Рис. 4.37. Примеры выбора плоскости разъема в штампах

Желательно расположить ее так, чтобы естественные уклоны облегчали извлечение поковки из штампа. Пример чертежа поковки приведен на рисунке 4.38.

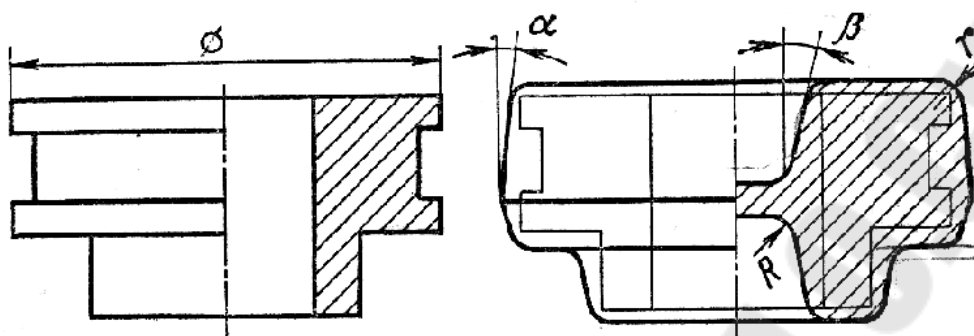


Рис. 4.38. Чертеж поковки, получаемой штамповкой

*Припуски на механическую обработку* назначают главным образом на сопрягаемые поверхности детали. Величина припусков определяя исходя из габаритов и массы поковки, вида штампового оборудования и требований к точности детали. *Припуски и допуски на штамповку* назначают в соответствии с ГОСТами. Для облегчения течения металла и извлечения поковки из штампа ее боковые поверхности должны иметь уклоны, которые назначают сверх припуска. *Уклоны* назначают в зависимости от глубины и сложности полости в пределах  $3...10^\circ$ . Для наружных поверхностей они назначаются меньше, чем для внутренних, вследствие температурной усадки. *Все пересекающиеся поверхности сопрягаются по радиусам*. При необходимости изготовления отверстия в поковке выполняют *наметку* отверстия с перемычкой, удаляемой впоследствии в специальных штампах. Для упрощения формы поковки в отдельных местах выполняют *напуски*. *Все размеры поковки увеличивают на величину усадки* и получают чертеж горячей поковки, по контуру которой изготавливают полость штампа. При штамповке в открытых штампах вдоль внешнего контура полости выполняют *облойную канавку*.

Поковки простой формы штампуют в одноручьевых штампах. Для изготовления поволок сложной конфигурации применяют многоручьевые штампы. *Ручьи многоручьевого штампа подразделяют на заготовительные и штамповочные*. К заготовительным, служащим для получения фасонной заготовки, относятся: протяжной, подкатной, гибочный и др. *Протяжной ручей* (рис. 4.39 2) служит для увеличения длины отдельных частей поковки за счет уменьшения площади их поперечного сечения (рис. 4.40). *Подкатной ручей* (рис. 4.39 1) слу-

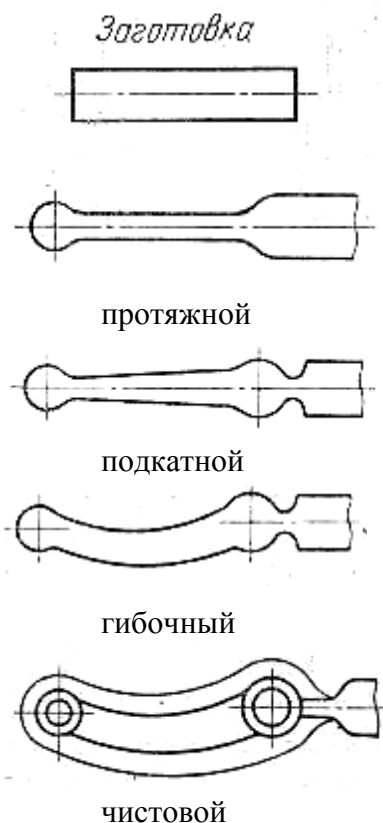


Рис. 4.39. Эскиз исходной заготовки, заготовок после обработки в протяжном, подкатном, гибочном и чистовом ручьях.

жит для местного увеличения сечения заготовки за счет уменьшения сечения рядом расположенных участков (рис. 4.40). В *гибочном ручье* (рис. 4.39 5) заготовке придается форма, соответствующая форме в плоскости разъема (рис. 3.40). При штамповке поковок, имеющих форму окружности в плане, в штампах предусматривают площадку для осадки поковок.

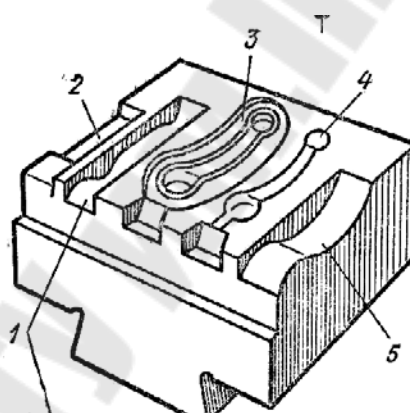


Рис. 4.40. Эскиз многоручьевого штампа

К *штамповочным* относятся: черновой (предварительный) (рис. 3.38 4) и чистовой (окончательный) (рис. 3.38 3). В черновом штамповочном ручье происходит основное формообразование поковки, а в чистовом – окончательная калибровка по размерам готовой поковки (рис. 3.39). Чистовой ручей (рис. 3.38 3) располагается в центре штампа, в зоне максимальной нагрузки.

### **Оборудование для горячей объемной штамповки (ГОШ)**

Для ГОШ применяют *молоты, горячештамповочные кривошипные прессы, горизонтально-ковочные машины, гидравлические прессы и машины специализированной штамповки*. Основными видами штамповочных молотов являются *паровоздушные*, принцип действия которых аналогичен ковочным. Масса падающих частей у них составляет от 630 кг до 25 т. У этих молотов усиленные направляющие стойки станины устанавливают на шаботе (рис. 4.41). Масса шабота

в 20...30 раз превышает массу падающих частей, что обеспечивает необходимую точность соударения штампов. Поковка обычно штампуются за 3...5 ударов. Скорость движения штампа 6...8 м/с. Принцип действия паровоздушных молотов основан на циклическом воздействии газовой фазы на поршень 5 рабочего цилиндра 6. Оно осуществляется путем передачи давления в нижнюю или верхнюю камеру рабочего цилиндра по воздушным магистралям из вспомогательного цилиндра 9. Возвратно-поступательные движения поршня вспомогательного цилиндра осуществляются кривошипным механизмом 10. основным рабочим органом молота является баба 4, прикрепленная к штоку 5 рабочего цилиндра. Вес бабы определяет ударную мощность молота и является его номинальной характеристикой. Верхний боек 3 закрепляется в пазу бабы и является подвижным деформирующим инструментом. Нижний боек 2 неподвижно закреплен на шаботе молота. Пуск кривошипного механизма, а следовательно и начало работы молота в виде периодического возвратно-поступательного движения верхнего бойка осуществляется нажатием на педаль 1. Имеются также *бесшаботные молоты*. В них шабот заменен подвижной нижней бабой, которая механической или гидравлической связью соединена с верхней бабой. На этих молотах штампуют крупные поковки в одноручьевых штампах.

***Кривошипный штамповочный пресс*** имеет электрический привод, рабочий орган движется с меньшей скоростью, он значительно проще в управлении. Усилие этих прессов от 6,3 до 120 МН. На таких прессах вращательное движение электродвигателя за счет кривошипно-шатунного механизма превращается в возвратно-поступательное движение ползуна пресса, к которому крепится верхняя часть штампа. Кинематическая схема кривошипного пресса приведена на рисунке 4.41 б. Вращение от электродвигателя 6 передается через малый шкив 5 и клиноременную передачу маховику 4 и валу 7, на котором он закреплен. На валу 7 установлено малое зубчатое колесо 8, передающее вращение большому зубчатому колесу 9. Соединение колеса 9 с кривошипным валом 11 осуществляется через фрикционную муфту включения 10, расположенную внутри колеса. С помощью этой муфты можно осуществлять сцепление колеса 9 с кривошипным валом или отсоединять его от вала. Кривошипный вал соединен с шатуном 2, который преобразует вращательное движение вала в возвратно-поступательное движение и передает его ползуну 1, перемещающемуся по направляющим станины пресса.

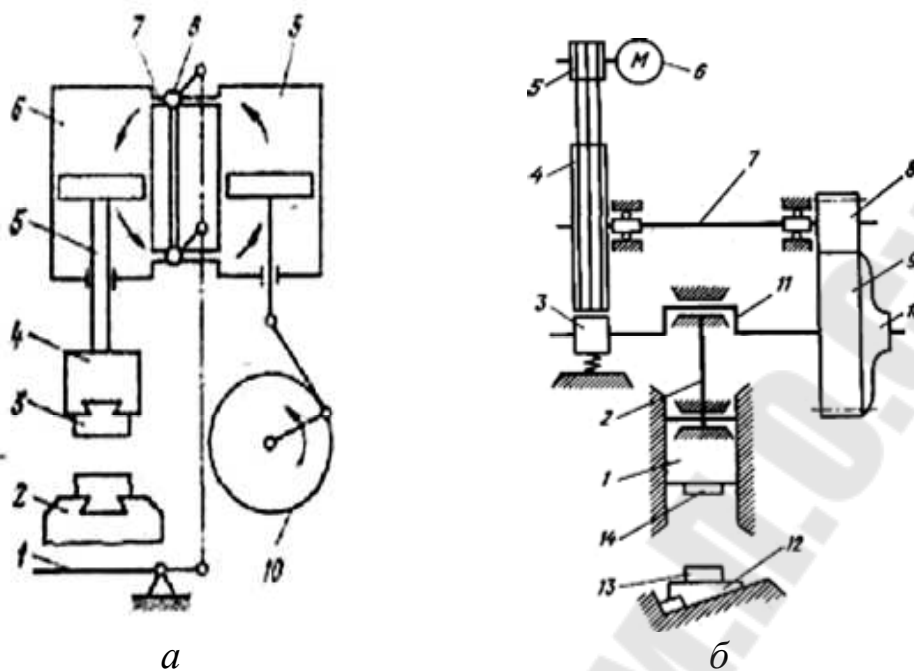


Рис. 4.41. Схемы паровоздушного молота (а) и кривошипного пресса (б)

Нижняя часть штампа крепится на столе. Деформирование заготовки производится за один ход ползуна. Производительность штамповки на них выше, чем на молотах. Высокая жесткость пресса и отсутствие ударов обеспечивают более высокую точность поковок, создают условия для автоматизации и механизации техпроцесса штамповки. Однако необходимо заготовки перед штамповкой полностью очищать от окалины, т.к. деформация происходит за один ход пресса. Стоимость пресса в 3...4 раза выше, чем молота аналогичного по мощности.

**Горизонтальн -ковочные машины** используются для получения сложных осесимметричных поковок. Формование поковок осуществляется в штампах, состоящих из 3 частей: неподвижной матрицы 1, подвижной матрицы 2 и пуансона 3 (рис. 4.42).

Нагретую заготовку (участок, подлежащий деформированию) закладывают в подвижную часть матрицы и поджимают к неподвижной ее части. При поступательном перемещении пуансона происходит свободная осадка выступающей части нагретой заготовки, а также деформация металла заготовки внутри полости матрицы. При обратном ходе пуансона матрица раскрывается и деформированная заготовка извлекается из матрицы. Основные операции, выполняемые на

горизонтально-ковочных машинах: высадка, прошивка и пробивка. За один проход можно деформировать часть прутка, выступающую из зажимной части длиной не более 3 диаметров заготовки.

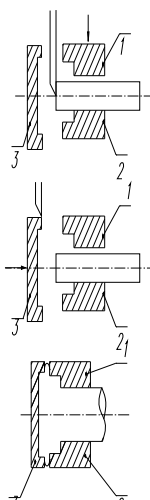


Рис. 4.42. Схема штамповки на горизонтально-ковочной машине

**Гидравлические штамповочные прессы** по устройству аналогичны ковочным. Усилие современных прессов составляют до 750 МН. На гидропрессах штампуют поковки коленчатых валов, различных рычагов, кронштейнов, крупногабаритных панелей и др.

#### **Холодная объемная штамповка (ХОШ)**

**Под холодной штамповкой** понимается штамповка без предварительного нагрева заготовки. Отсутствие оксидной пленки на поверхности заготовки обеспечивает высокое качество поверхности детали и высокую точность размеров. Холодной объемной штамповкой получают детали по 3–4 классу точности, что уменьшает объем обработки резанием или вообще исключает ее. Основные разновидности ХОШ – холодное выдавливание, холодная высадка и чеканка, холодная штамповка в открытых штампах.

**Выдавливание** производят в штампах путем деформирования заготовок, отрезанных из проката. Заготовку помещают в полость, из которой металл под определенным усилием выдавливается в отверстия, имеющиеся в инструменте. При этом заготовка находится в состоянии неравномерного всестороннего сжатия, что допускает большие степени деформации. Выдавливание обычно выполняют на кривошипных или гидравлических прессах. Различают *прямое, обратное и комбинированное выдавливание* (рис. 4.43). При *прямом выдавливании* металл вытекает в направлении действия рабочего усилия. При

обратном выдавливании течение металла осуществляется в направлении обратном действующему усилию (например, в кольцевой зазор между пуансоном и матрицей).

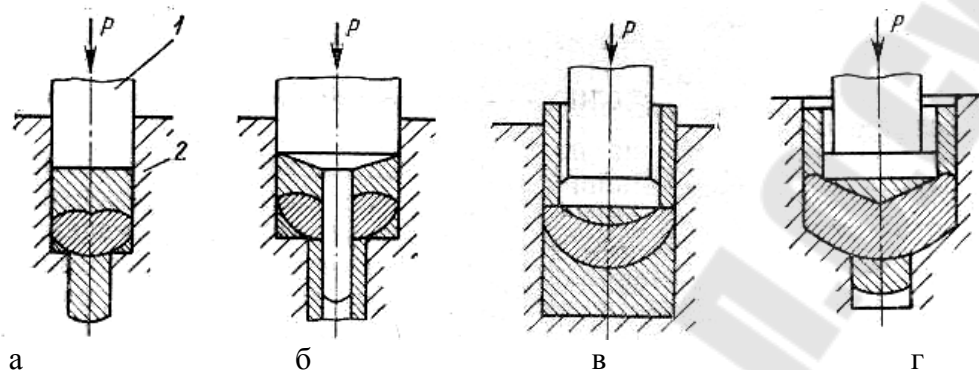


Рис. 4.43. Схемы выдавливания: а – прямого; б – прямого полого изделия; в - обратного; г – комбинированного

При боковом выдавливании течение металла происходит в отверстие в боковой части матрицы в направлении не совпадающем с направлением действия усилия. Этим методом можно получать изделия типа тройника. В этом случае делаются разъемные матрицы. При комбинированном выдавливании деформирование материала происходит одновременно по нескольким направлениям.

Метод выдавливания позволяет изготавливать тонкостенные детали с толщиной стенок 0,1...0,2 мм (из пластичных металлов) при диаметре тубы 20...40 мм. Однако чем больше степень деформации, тем больше должно быть действующее усилие. Оно возрастает при увеличении высоты деформируемой заготовки, особенно в области застойных зон.

**Холодная высадка** применяется для образования местного утолщения заготовки требуемой формы (головки болтов, заклепок, винтов и др.). Производится она на специальных одно-, двух-, трех-, четырехпозиционных холодновысадочных автоматах. Штамповка производится из прутка или проволоки. На рисунке 4.44 приведена схема высадки шляпки гвоздя на холодновысадочном автомате с разъемной матрицей. Заготовка – пруток 4 подается до упора 2, (рис. 4.44а) Половинки матрицы смыкаются (рис. 4.44 б) и высадочным пуансоном 1 формуется головка (рис.4.44 в). Для выталкивания готовой поковки пуансон возвращается в первоначальное положение, а матрица размыкается, освобождая стержень поковки (рис. 4.44 г).



На холодновысадочных автоматах штампуют заготовки диаметром от 0,5 до 40 мм. Штамповка на холодновысадочных автоматах обеспечивает высокую производительность до 20...420 деталей в минуту, высокую точность (зачастую не требуется дополнительная механическая обработка), высокий коэффициент использования металла (до 0,95).

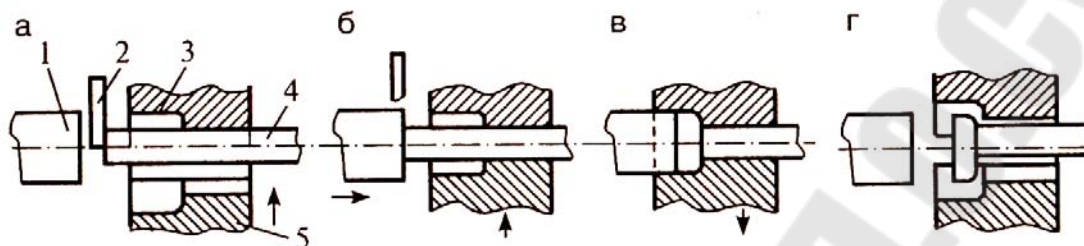


Рис. 4.44. Схема изготовления детали на холодновысадочном автомате

**Чеканка** – операция, посредством которой выполняются выпукло-вогнутые рельефы на поверхности детали за счет незначительного перемещения металла под штампом. Чеканкой изготавливают поковки, приобретающие высокохудожественное изображение на обработанной давлением поверхности – монеты, награды, элементы символики и др. В качестве оборудования для осуществления процесса чеканки применяют кривошипные и гидравлические прессы.



а



б

Рис. 4.45. Поковка (а) и чеканочный пуансон (б) для изготовления государственной награды Республики Беларусь ордена «Франциск Георгий Скарыйна»

### Холодная листовая штамповка

**Листовая штамповка** применяется для получения плоских и пространственных изделий из листового проката (листов, полос, лент). При листовой штамповке используют низкоуглеродистые и легированные стали с высокой пластичностью, а также цветные металлы и сплавы на их основе. Метод позволяет получать сложные изделия малой массы с минимальными отходами при заданной прочности и жесткости. Отличается высокой производительностью, обеспечивает высокое качество поверхности и точность размеров, легко поддается автоматизации. В виду сложности и высокой стоимости штампового инструмента она целесообразна в серийном и массовом производстве.

Изделия из листового проката получают за несколько последовательных операций, которые можно разделить на две группы: *разделительные и формообразующие*. К *разделительным* относятся: обрезка, вырубка, пробивка отверстий. К *формообразующим* – гибка, формовка, вытяжка, отбортовка, раздача, обжим.

**Отрезка** – отделение части заготовки по незамкнутому контуру на специальных машинах ножницах и в штампах. Чаще всего отрезка используется как заготовительная операция для деления листа на полосы определенной ширины. Применяются ножницы с поступательным движением режущих кромок ножа - гильотины и с вращательным - дисковые ножницы. Режущие кромки ножниц поступательного движения устанавливают под углом  $1...5^\circ$  друг к другу для снижения сил резания.

**Вырубка и пробивка** – отделение части заготовки по замкнутому контуру. Вырубкой оформляют наружный контур детали, а пробивкой – внутренний. Вырубку и пробивку осуществляют в специальных штампах (рис. 4.46). Зазор  $\Delta$  между пуансоном  $I$  и матрицей  $3$  выбирается из условия  $\Delta = (0,05...0,1)S$ , где  $S$  – толщина заготовки. При вырубке размеры отверстия матрицы равны размерам детали, а размеры пуансона на  $2\Delta$  меньше их. При пробивке отверстий размеры пуансона равны размерам отверстия, а размеры матрицы на  $2\Delta$  больше их.

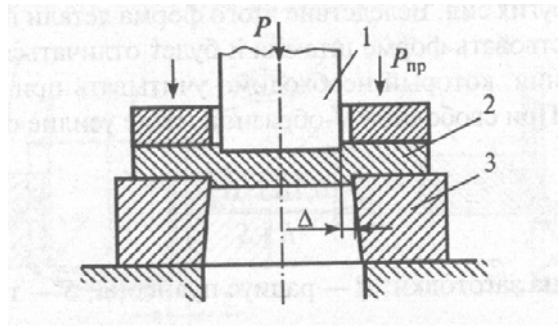


Рис 4.46. Схема вырубki и пробивки

**Гибка** – операция, изменяющая кривизну заготовки без изменения ее линейных размеров. Гибка бывает Т-образной, U – образной и многоугловой. Материал 1 при изгибе деформируется пластически на участке, контактирующем с пуансоном 2, при этом наружные слои растягиваются, а внутренние – сжимаются. В среднем слое деформация отсутствует. Минимальный радиус скругления рабочего торца пуансона (рис. 4.47) в зависимости от пластичности материала составляет  $(0,1...2)S$ , где  $S$  – толщина деформируемого листа. При изгибе деталей в нескольких плоскостях обычно процесс производят последовательным деформированием в нескольких штампах.

**Отбортовка** – образование борта по внутреннему или наружному контуру заготовки 1, расположенной на матрице, путем внедрения пуансона 3 в отверстие 2 (рис. 4.48). При отбортовке металл в зоне деформации растягивается и становится тоньше. Допустимое без разрушения увеличение диаметра отверстия при отбортовке  $d_1/d_0 = 1,2...1,8$  в зависимости от пластичности материала, а также от относительной толщины  $S/d_0$ .

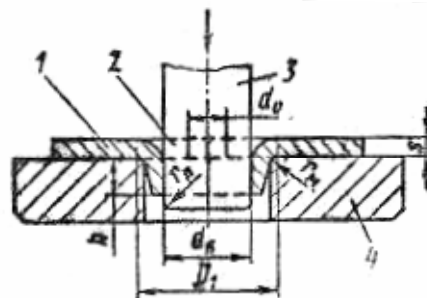
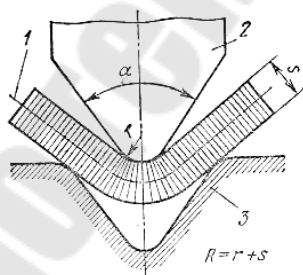


Рис. 4.46. Схема процесса гибки Рис. 4.47. Схема процесса отбортовки

**Обжим** – уменьшение поперечных размеров полой заготовки, установленной в матрице пуансоном с внутренним коническим отверстием. За один проход обычно получают  $d_{изд} = (0,7...0,8)D_{заг}$ . При

большей степени обжатия возможно образование складок и разрушение. При необходимости большего обжима нужно операцию производить за несколько переходов. Угол  $\alpha$  выбирается в пределах  $10...20^\circ$  (рис. 4.49).

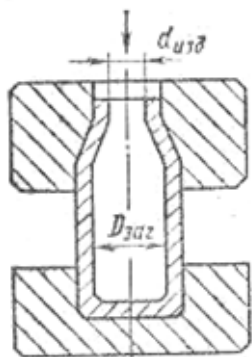


Рис. 4.49. Схема обжима горловины

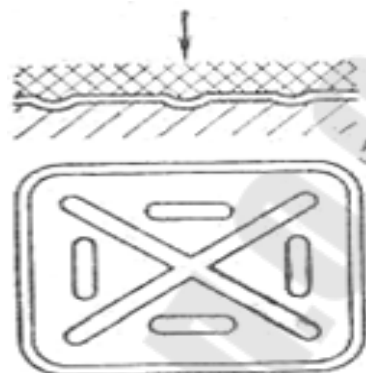


Рис. 4.50. Схема рельефной формовки

**Раздача** – операция увеличения поперечного сечения полый заготовки на концевой части коническим пуансоном, входящим внутрь заготовки. Относительная деформация при раздаче должна быть не более  $0,8...0,9$  от таковой при разрыве.

**Формовка** – операция получения местных углублений и выступов в плоской или полый заготовке путем локального растяжения отдельных ее участков (рис. 4.50). Формовкой создают ребра жесткости, увеличение размеров отдельных частей полый заготовки. Часто для этих целей используют резиновые вкладыши или жидкости.

**Вытяжка** – операция образования полого тонкостенного изделия из плоской или полый заготовки (рис. 4.51). Форма изделий может быть разнообразной: цилиндрической, полусферической, коробчатой и др., как с фланцем, так и без него. Заготовки для вытяжки получают вырубкой. Вытяжка может производиться *без утонения стенок и с их утонением*.

При *вытяжке без утонения стенок* заготовку 1 укладывают на плоскость матрицы 5. Пуансон 4 давит на ее центральную часть и смещает в отверстие матрицы. Центральная часть заготовки тянет за собой периферийную, образуя стенки вытянутого изделия. При отношении диаметра заготовки  $D$  к диаметру полого изделия  $d$  выше  $(18...20)S$  возможно образование складок во фланцевой части 6. Для предотвращения их образования применяют прижимную плиту 3. В зависимости от механических свойств деформируемого металла до-

пускается коэффициент вытяжки  $K = D/d = 1.6 \dots 2.1$ . Кромки матрицы и пуансона закругляют по радиусу равному  $5 \dots 10$  толщин заготовки для снижения концентрации напряжений и предотвращения разрушения заготовки. При вытяжке без утонения стенки зазор между пуансоном и матрицей выбирают из условия  $Z = (1,1 \dots 1,3)S$ . Если необходимую степень вытяжки нельзя получить при одном переходе, делается несколько переходов, при необходимости с рекристаллизационным отжигом.

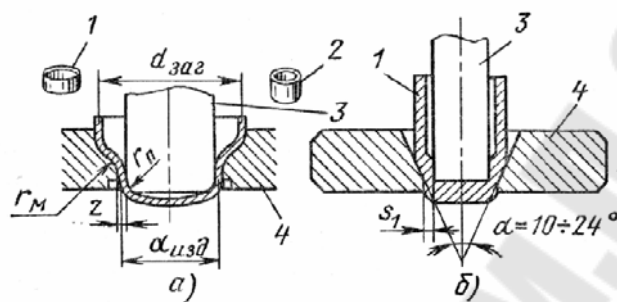


Рис. 4.51. Схемы вытяжки без утонения (а) и с утонением (б) стенки

При вытяжке с утонением стенки зазор между пуансоном 3 и матрицей 4 делается меньше толщины стенки, которая сжимаясь утоняется и удлиняется. За один проход при этом возможно утонение стенки в  $1,5 \dots 2$  раза. Размеры заготовки определяют из условия равенства объемов заготовки и детали, принимая во внимание, что толщина доньшка не изменяется.

Листовая штамповка обычно производится на кривошипных прессах простого и двойного действия, а также гидравлических прессах.

**Высокоскоростная штамповка** характеризуется тем, что кратковременное приложение больших усилий разгоняет заготовку до скоростей порядка  $150$  м/с, последующее ее деформирование происходит за счет накопленной в период разгона кинетической энергии. Основные разновидности высокоскоростной штамповки: штамповка взрывом, электрогидравлическая, электромагнитная.

**Штамповка взрывом** (рис. 4.52а) обычно осуществляется в водяном бассейне. Заготовка 3 закрепляется между матрицей 5 и прижимом 4. Полость матрицы под заготовкой вакуумируют через соответствующую систему 6 и опускают в бассейн с водой. Заряд с детонатором 1 подвешивают в воде над заготовкой. Взрыв образует ударную волну высокого давления. Процесс штамповки длится тысячные доли секунды. При штамповке взрывом не требуется дорогостоящего прессового оборудования и упрощается конструкция штампа. При-

меняют ее для изготовления деталей типа днищ, обечаек, корпусных деталей ракет, самолетов и др.

**Электродинамическая штамповка** также осуществляется в бассейне с водой. Ударная волна возникает при кратковременном электрическом разряде в жидкости.

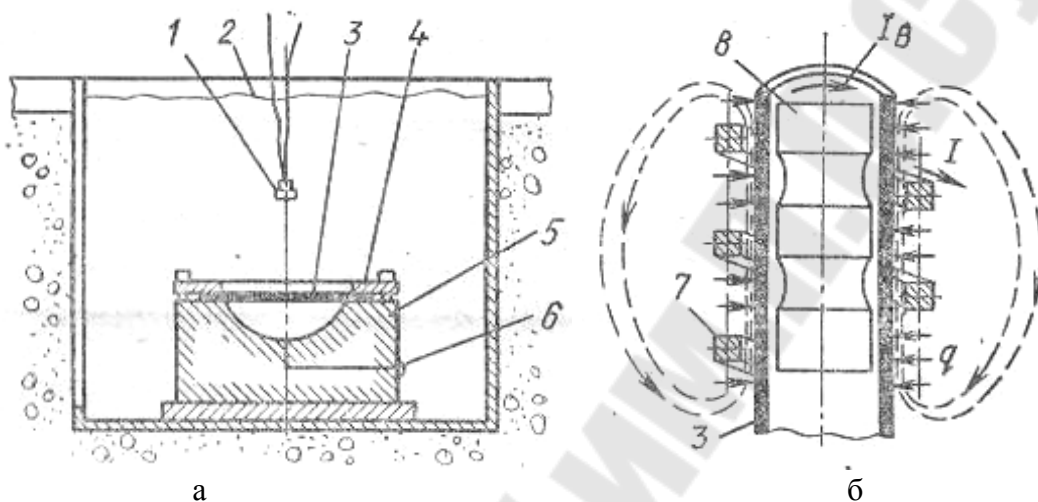


Рис. 4.52. Схемы высокоскоростной штамповки:  
а – взрывом; б - электромагнитной

**При электромагнитной штамповке** электрическая энергия преобразуется в механическую за счет импульсного разряда батареи конденсаторов через соленоид, вокруг которого возникает мгновенное магнитное поле высокой мощности, наводящее вихревые токи в трубчатой токопроводящей заготовке (рис. 4.52б). Взаимодействие магнитных полей вихревых токов и поля индуктора создают механические силы, деформирующие заготовку. Она приобретает сложную пространственную форму соответствующую конфигурации внешней поверхности пуансона.

#### 4.10. Ротационное деформирование

**При ротационном деформировании** формоизменение заготовки осуществляется вращающимся инструментом. В промышленности нашли применения ротационные технологии получения шестерен, резьб, раскатки кольцевых заготовок.

**Накатка зубчатых колес** производится двумя вращающимися в одну сторону зубчатыми валками аналогично поперечной прокатке. Гладкая цилиндрическая заготовка нагревается в индукторе и подает-

ся в валки. Зубцы валков постепенно внедряются в нагретую заготовку и формируют профиль зубьев на венце колеса. Данная технология повышает коэффициент использования металла, обеспечивает высокую производительность, повышает их износостойкость. Мелкомодульные колеса могут накатываться в холодном состоянии. По аналогичной схеме накатывается резьба с помощью резьбонакатных роликов с наружным резьбовым профилем.

Методом ротационного деформирования получают полые изделия из листовых заготовок на универсальных токарных станках с небольшой модернизацией. Круглая заготовка 2 с помощью прижима 3 поджимается к оправке 1, закрепленной в шпинделе токарного станка. При вращении оправки давилник 4, перемещаясь по копиру, деформирует металл, обеспечивая вытяжку изделия из плоского листа (рис. 4.53). В случае деформирования больших поверхностей применяются поддерживающие ролики б. Использование этой технологии исключает необходимость в дорогостоящей оснастке, значительно экономит энергетические затраты.

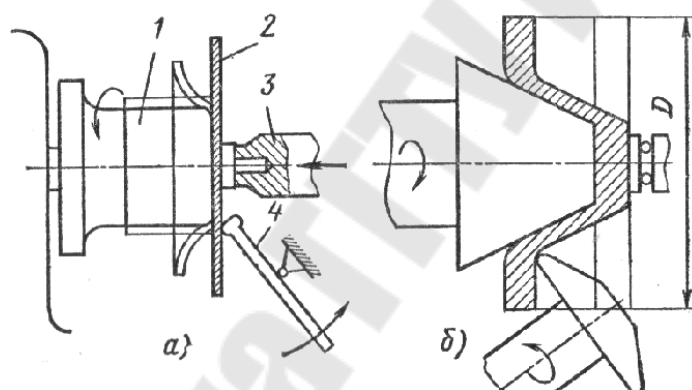


Рис. 4.53. Схемы ротационного деформирования

### Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные методы обработки металлов давлением.
2. Какие основные типы машин применяют для обработки давлением?
3. Какое нагревательное оборудование применяют при горячей обработке давлением?
4. В чем суть процесса прокатки и какие виды ее применяют в промышленности?
5. Какое оборудование применяют для прокатки?

6. В чем сущность процесса волочения и особенности волочильного оборудования?

7. Охарактеризуйте основные операции, выполняемые ковкой.

8. В чем состоят особенности горячей штамповки в открытых и закрытых штампах?

9. Перечислите основные разновидности холодной объемной штамповки.

10. Охарактеризуйте основные разновидности холодной листовой штамповки.



## Глава 5. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Сваркой** называется процесс получения неразъемного соединения в результате возникновения атомно-молекулярных связей между соединяемыми деталями. Для образования прочной связи между атомами и молекулами необходимо выполнение следующих условий: освобождение свариваемых поверхностей от загрязнений, оксидов и адсорбированных на них инородных атомов; энергетическая активация поверхностных атомов; сближение поверхностей на расстояния, сопоставимые с межатомными расстояниями в свариваемых заготовках.

Создание необходимых условий для сварки осуществляется путем энергетического воздействия на материал в зоне сварки. Энергия подводится в виде теплоты, упругопластической деформации, электронного, ионного или электромагнитного воздействия.

Сварные соединения можно получать двумя принципиально различными путями: *сваркой плавлением и сваркой давлением*. При **сварке плавлением** образование межатомных связей происходит в жидкой фазе, получаемой за счет местного сплавления соединяемых деталей, без приложения давления. При этом расплавляются кромки свариваемых деталей, либо дополнительный присадочный или электродный металл. После кристаллизации образуется сварной шов, имеющий структуру литого металла. При **сварке давлением** образование межатомных связей происходит в твердом агрегатном состоянии. Сближение атомов в контактирующих слоях происходит в результате их совместного упруго - пластического деформирования, в процессе которого происходит выравнивание микронеровностей, разрушение оксидных пленок и образование атомно-молекулярных связей. Сварка давлением может производиться *без предварительного нагрева соединяемых деталей – механическая сварка* (сварка трением, холодная сварка, сварка взрывом, ультразвуковая сварка) и *с предварительным нагревом до пластического состояния или до оплавления – термомеханическая* (контактная, диффузионная, газопрессовая). Расплавление основного и присадочного металлов возможно осуществлять за счет энергии *дугового разряда – электродуговая сварка; термической, выделяемой током, проходящим через шлаковую ванну – электрошлаковая; потока быстрых электронов – электронно-лучевая; струи ионизированного газа – плазменная; мощного*

светового потока – лазерная; экзотермической реакции горения газов – газовая и порошковых горючих смесей – термитная сварка.

## 5.2. Физические основы получения сварных соединений

Прочность и другие свойства сварных соединений определяются **свариваемостью материалов**, под которой понимается свойство металла или сочетания металлов образовывать сварные соединения, отвечающие требованиям, обусловленным конструкцией и условиями эксплуатации изделий. Свариваемость считается *высокой* если соединения с заданными свойствами можно получить различными способами сварки без усложнения технологии. Свариваемость определяется в основном типом и свойствами структуры, образующейся в сварном соединении.

При сварке однородных металлов и сплавов в сварном соединении, как правило, образуется структура, близкая структуре соединяемых заготовок. Прочность соединения обеспечивается внутрикристаллическими связями и свариваемость оценивается как хорошая или удовлетворительная. *Хорошей* свариваемостью обладают низкоуглеродистые и низколегированные стали. *Удовлетворительно* свариваемы цветные металлы и их сплавы, среднеуглеродистые и среднелегированные стали, полимерные материалы. Улучшают свариваемость марганец и кремний, вводимые в стали в небольших количествах. При сварке разнородных материалов, в зависимости от степени их взаимной растворимости в твердом состоянии, в сварном соединении образуются твердые растворы, химические и интерметаллидные соединения или механические смеси соединяемых материалов. Прочность соединений во многом определяется взаимодействием по границам частиц и зерен. Механические свойства соединений могут значительно отличаться от таковых для свариваемых материалов. При этом возможно образование несплошностей в виде трещин и несплавлений. *Ограниченно* свариваемы высоколегированные стали. *Плохо* свариваемыми материалами являются чугуны.

При воздействии высоких температур в *зоне термического влияния* (ЗТВ) происходит изменение структуры и физико-механических свойств свариваемых металлов, возникновение термических напряжений, дефектов в виде пор, трещин и др. Характер протекания этих процессов зависит от химического состава свариваемых металлов и сварочных электродов, скорости протекания процессов

нагрева и охлаждения, фазовых превращений. Например, в легированных сталях в зоне термического влияния возможно существенное повышение твердости и снижение пластичности. У материалов с пониженной свариваемостью возможно образование горячих и холодных трещин как в шве, так и в ЗТВ.

**Горячие трещины** образуются непосредственно в шве в период его кристаллизации при нахождении его в двухфазном состоянии (твердом и жидком). В результате действия высоких сварочных деформаций растяжения возможно разрушение шва по не затвердевшим жидким прослойкам между кристаллитами. В основном эти трещины образуются вдоль оси сварочных швов в зоне образования столбчатых структур. Образование горячих трещин характерно при сварке металлов с широким интервалом температур кристаллизации, при сварке разнородных материалов, при наличии в металле шва вредных примесей.

**Холодные трещины** возникают обычно после полного затвердевания шва, если сварочные напряжения превысят прочность металла. Потенциальную склонность к образованию холодных трещин можно оценить по значению эквивалента углерода в процентах

$$C_{\text{экв}} = C + \text{Si}/24 + \text{Mn}/6 + \text{Cr}/5 + \text{Ni}/10 + \text{Mo}/4 + \text{V}/114 + 5\text{B}.$$

К образованию холодных трещин склонны стали с  $C_{\text{экв}}$  большим или равным 0,4 %.

Возникновение собственных **сварочных напряжений** связано с неравномерностью температурного поля в основном свариваемом материале, шве и в околошовной зоне (ЗТВ). Неравномерность разогрева металлов вызывает и неравномерность температурных деформаций, которые ограничиваются вследствие сопротивления менее нагретого основного металла. В результате этого вместо удлинения отдельных слоев свариваемого металла на величину  $\alpha_t T$  ( $\alpha_t$  – температурный коэффициент линейного расширения металла) происходит равномерное удлинение всей свариваемой заготовки, в результате чего грань пластины 1 в момент максимального разогрева занимает положение 2 (рис. 5.1а). В связи с этим металл шва и прилегающей к нему зоны при нагреве претерпевает необратимую пластическую деформацию сжатия, пропорциональную заштрихованной зоне 3. При охлаждении и обратной температурной деформации различные слои металла должны были бы занять положение в соответствии с зависимостью  $-\alpha_t T$  (рис. 5.1б). Однако их температурная деформация огра-

ничивается реакцией основного металла и происходит равномерное укорочение пластины и грань 1 занимает положение 5. Металл шва будет соответственно испытывать внутреннюю упруго - пластическую деформацию пропорциональную заштрихованной площади 6. Соответствующие упругие растягивающие напряжения в шве и ЗТВ уравниваются сжимающими напряжениями в основном металле. Снижение внутренних напряжений это один из путей предупреждения трещин. Холодные трещины возникают в углеродистых и легированных сталях, которые при сварке претерпевают полную или частичную закалку, склонные к росту зерна при нагреве, имеющие повышенное насыщение газами, что приводит к снижению прочности и пластичности.

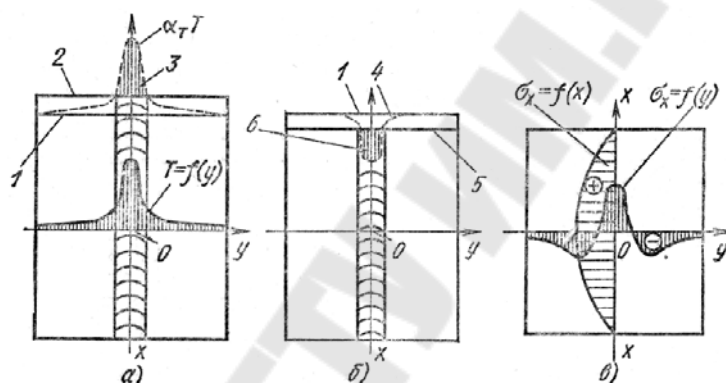


Рис. 5.1. Схема напряженного состояния сварного шва

**Поры** в сварных швах возникают в процессе кристаллизации вследствие уменьшения растворимости газов в твердом агрегатном состоянии по сравнению с жидким. Причинами образования пор могут быть: повышенная влажность электродных покрытий, флюсов, интенсивные окислительные процессы в шве, высокая скорость кристаллизации.

### 5.3. Сварка плавлением

#### 5.3.1. Дуговая сварка

**Источником теплоты** при дуговой сварке служит электрическая дуга, которая горит между электродами или между электродом и свариваемым металлом. Впервые электрический дуговой разряд для сварки и резки металла был применен в 1882 г. русским инженером Н.Н. Бенардосом. По данному способу применялся неплавящийся

угольный электрод, а соединение свариваемых изделий осуществлялась расплавлением присадочного металла. В 1888 г. русским инженером Н.Г. Славяновым был разработан способ сварки плавящимся электродом, который и служил присадочным материалом. В настоящее время этот способ наиболее широко используется в промышленности.

В зависимости от материала и числа электродов, а также способов включения электродов и заготовок в цепь электрического тока, различают следующие **виды дуговой сварки**: *сварка неплавящимся электродом 1* (графитовым или вольфрамовым) дугой прямого действия 2 (рис. 5.2а), при которой соединение выполняется за счет расплавления только основного металла 3, или с применением присадочного материала; *сварка плавящимся электродом* (рис. 5.2б) дугой прямого действия 2, при которой одновременно расплавляется основной металл и электрод, пополняющий сварочную ванну жидким металлом; *сварка косвенной дугой*, горящей между двумя неплавящимися электродами, при которой основной металл расплавляется теплотой столба дуги (рис.5.2в); *сварка трехфазной дугой 5*, при которой дуга горит между электродами и основным металлом (рис.5.2г).

Питание электрической дуги осуществляется постоянным или переменным током. При использовании постоянного тока различают *сварку на прямой и обратной полярностях*. При *прямой полярности* электрод подключается к отрицательному полюсу источника тока, а деталь – к положительному.

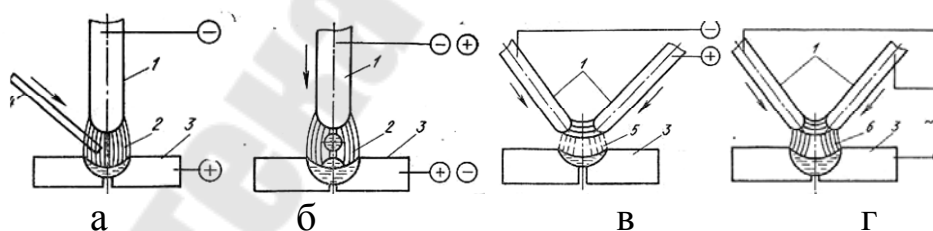


Рис. 5.2. Схемы сварки: а – неплавящимся и б – плавящимся электродом дугой прямого действия; в – косвенной дугой неплавящимися электродами; г – трехфазной дугой

Различают **три вида сварочной дуги**: открытую, защищенную и закрытую. В *открытой дуге* сварочная ванна не защищена от воздействия воздуха. *Защищенная дуга* получается при образовании газовой защиты вследствие применения электродов с обмазкой (роль защиты выполняет образующийся при сварке шлак) или вдувания в зону

сварки инертных газов. *Закрытая дуга* погружена в жидкость, газовую среду или в стекловидный флюс.

В практике широко используются следующие **способы дуговой сварки**: *плавящимся электродом открытой дуги, плавящимся электродом под слоем флюса, плавящимся электродом в среде защитного газа, неплавящимся электродом в среде защитного газа.*

В качестве *плавящихся электродов* используют металлические электроды – стальные, чугунные, из цветных металлов. В качестве *неплавящихся* – вольфрамовые (при аргоно-дуговой сварке), угольные и графитовые – при сварке стальных изделий малой толщины, при наплавке твердых сплавов и сварке цветных металлов. Стальные электроды имеют длину 250...450 мм, диаметром 1...12 мм. Изготавливают их из стальной электродной проволоки: углеродистой – Св08, Св08Г, Св10Г2С, легированной – Св18ХМА, Св10Х5М, высоколегированной – Св07Х18Н9ТЮ и др.

Электроды для сварки конструкционных сталей обозначают буквой Э после чего следуют цифры, показывающие временное сопротивление при разрыве металла в кгс/мм<sup>2</sup>, например, Э34. В обозначениях электродов для сварки теплоустойчивых сталей вводятся буквы, указывающие содержание легирующих элементов – ЭХМ, ЭХМФ и др. Электроды для сварки высоколегированных сталей классифицируются по структуре и составу металла сварного шва: ЭА-3М6, ЭФ-13 (А – аустенитная, Ф – ферритная). Электроды, используемые для ручной дуговой сварки, покрывают обмазкой, при автоматической сварке применяют флюсы. Назначение обмазки и флюсов – защитить расплавленный металл в ванне от взаимодействия с кислородом и азотом воздуха, стабилизировать горение дуги. При сварке малоответственных деталей из углеродистых сталей применяют электроды с тонкой обмазкой толщиной 0,1...0,4 мм, для ответственных деталей – с обмазкой толщиной 0,6...3 мм, в состав которых вводят шлакообразующие, раскисляющие, газообразующие, ионизирующие и др. вещества. Обычно используют обмазки ОММ-5, ЦЛ-2. Угольные электроды изготавливают диаметром 6...30 мм длиной 300 мм.

**Электродуговая сварка подразделяется на:** *ручную, полуавтоматическую и автоматическую.* Для питания электрической дуги применяют специальные сварочные машины и аппараты. Сварка может вестись на постоянном и переменном токе. При постоянном токе более устойчивая дуга, но сложнее оборудование.

**Электрическая дуга и ее свойства**

**Электрическая дуга** представляет собой мощный стабильный электрический разряд в ионизированной атмосфере газов и паров металла. Ионизация дугового промежутка происходит во время зажигания дуги и непрерывно поддерживается во время ее горения. Процесс зажигания дуги включает три этапа. *Первый этап* – касание электродом детали. В момент касания электродом заготовки по наиболее сближенным шероховатостям происходит короткое замыкание, вызывающее разогрев торца электрода и заготовки в зоне контакта с электродом (рис. 5.3а). *Второй этап* – отвод электрода на расстояние 3...6 мм. При этом под действием электрического поля с разогретого торца электрода начинается термоэлектронная эмиссия электронов при прямой полярности, а при обратной – с заготовки. Столкновение быстро движущихся электронов от катода к аноду с молекулами газов и паров металла, находящихся в межэлектродном пространстве, приводит к их ионизации (рис. 5.3б). *Третий этап* – возникновение устойчивого дугового разряда. В результате ионизации межэлектродного промежутка он становится электропроводным и возникает устойчивый дуговой разряд в столбе дуги (рис. 5.3в).

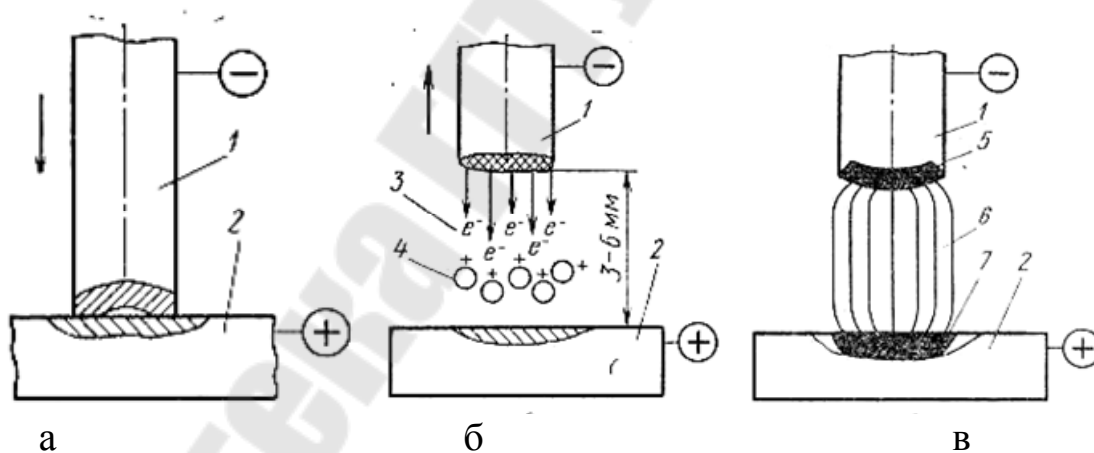


Рис. 5.3. Стадии зажигания дуги

Поверхности электрода и заготовки разогреваются до 2700...2900 °С. Причем в анодной области дуги, как правило, выделяется тепла больше чем в катодной. При сварке дугой переменного тока температуры обеих поверхностей выравниваются в связи с периодической сменой полярности. Температура в центре дуги достигает 6000 °С.

**Электрические свойства дуги** описываются *статической вольт – амперной характеристикой*, представляющей собой зависи-

мость между напряжением и током дуги в состоянии устойчивого горения (рис. 5.4).

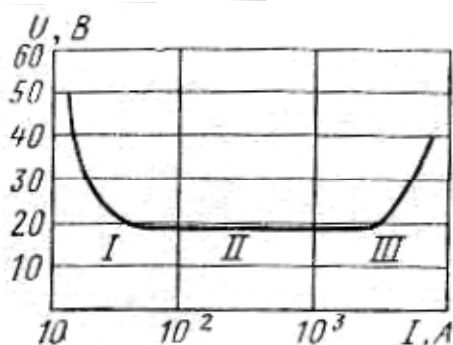


Рис. 5.4. Вольт-амперная характеристика электрической дуги

На этой кривой можно выделить три характерных участка. На первом участке с повышением силы тока увеличивается степень ионизации дугового промежутка и напряжение, требуемое для поддержания устойчивой дуги, уменьшается. Характеристика называется *падающей*. На втором участке возрастает сечение дуги, при этом плотность тока и напряжение дуги остаются постоянными. Характеристика называется *жесткой*. На третьем участке при повышении тока рост сечения дуги ограничен сечением электрода, в результате чего увеличивается плотность тока и напряжение дуги. Характеристика – *возрастающая*. Первый и второй участки обеспечивают крупнокапельный перенос расплавленного электродного металла в сварочную ванну, а третий – мелкокапельный или струйный. На первом участке дуга малоустойчива и имеет ограниченное применение. Для стабилизации дуги в сварочную цепь необходимо включение осциллятора. В основном используется жесткая характеристика. На этом участке напряжение дуги  $U_d$  пропорционально ее длине  $L_d$ :

$$U_d = \alpha + \beta \cdot L_d,$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, зависящие от химического состава свариваемых металлов, газа в дуге, типа сварки.

Для стальных электродов при ручной дуговой сварке принимается  $\alpha = 10B$ ,  $\beta = 2B/мм$ . Длина дуги не превышает 8 мм.

**Полная тепловая мощность дуги** зависит от величины сварочного тока  $I_{св}$  и напряжения дуги  $U_d$ :

$$Q = k \cdot I_{св} \cdot U_d \text{ (Дж/с),}$$



где  $k$  – коэффициент несинусоидальности при сварке на переменном токе (на постоянном токе  $k = 1$ ).

При переменном токе  $k = 0,7 \dots 0,97$ , что говорит о снижении мощности дуги переменного тока. Это связано с тем, что при переменном токе, например, с частотой 50 Гц, дуга вынуждена 100 раз в секунду зажигаться и гаснуть. При этом часть энергии затрачивается на возобновлении ионизации межэлектродного зазора. Для большей устойчивости дуги на переменном токе в дуговой промежуток вводят легкоионизируемые элементы.

Часть мощности электрической дуги расходуется на нагрев окружающего пространства, в связи с чем введено понятие - коэффициент полезного действия (КПД), определяющего мощность, затрачиваемую непосредственно на расплавление металла электрода и заготовки. **Эффективная тепловая мощность сварочной дуги** определяется по формуле  $q = \eta Q$ . Коэффициент полезного действия для ручной дуговой сварки принимается 0,8, для сварки в защитных газах – 0,6, под флюсом – 0,9, электрошлаковой – 0,7.

### Источники питания сварочной дуги

Источники питания должны обеспечивать напряжение до 60...80 В, не выходить из строя при коротком замыкании, иметь регулятор сварочного тока. *Источники питания характеризуются вольт-амперной зависимостью напряжения на выходных клеммах от тока электрической цепи, называемой внешней характеристикой. Внешние характеристики источников питания* могут быть следующих основных видов: *падающая 1, полого падающая 2, жесткая 3 и возрастающая 4* (рис. 5.5а).

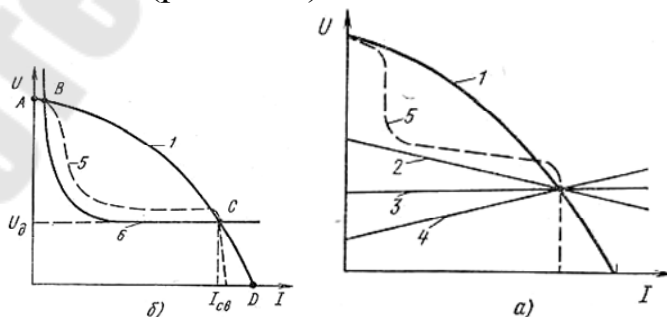


Рис. 5.5. Внешние характеристики источников питания

Источник тока выбирается в зависимости от вольт - амперной характеристики дуги, соответствующей принятому способу сварки. Наиболее широкое применение получили источники с падающей характеристикой (для дуги с жесткой характеристикой, РДС, под флюсом, в защитных газах неплавящимся электродом). Режим горения дуги определяется точкой пересечения характеристики дуги и источника тока (точка С рис. 5.5б). Точка А соответствует режиму холостого хода, когда дуга не горит и сварочная цепь разомкнута, точка В - режиму неустойчивого горения дуги, точка С – устойчивому горению дуги и точка D – режиму короткого замыкания при ее зажигании. Источники питания с возрастающей или жесткой характеристикой применяют при сварке в режиме возрастающей характеристики дуги (в защитных газах плавящимся электродом, автоматическая под флюсом током повышенной плотности).

*Для питания сварочной дуги применяют источники переменного тока (сварочные трансформаторы) и постоянного тока (выпрямители и генераторы).* На постоянном токе дуга горит устойчивее, но источники питания постоянного тока более сложные и менее надежные чем сварочные трансформаторы переменного тока.

*Сварочные трансформаторы,* изготовленные по классической (аналоговой) схеме преобразуют сетевое напряжение в пониженное, необходимое для сварки. Управление сварочным током обеспечивается за счет изменения индуктивности вторичной цепи с помощью включенного в сварочную цепь дросселя, или за счет осевого смещения вторичной обмотки относительно первичной. Изменение зазора индуктивного сопротивления дросселя изменяет его индуктивность, а соответственно индуктивность вторичной цепи, что приводит к изменению сварочного тока при относительно постоянном напряжении дуги. Аналогичные процессы происходят при смещении обмоток трансформатора. Выпускаются сварочные трансформаторы для РДС и механизированной сварки под флюсом. Для этих же видов сварки выпускаются *агрегаты в сочетании понижающего трансформатора с мостовым выпрямительным блоком.*

Сварочные трансформаторы имеют высокий КПД, но в технологическом отношении предпочтительнее источники постоянного сварочного тока. Так как они обеспечивают более устойчивое горение дуги. Наилучшие показатели для преобразования переменного тока в постоянный реализуются в современных инверторных источниках сварочного тока (рис. 5.6). Схема сварочного аппарата инверторного

типа позволяет увеличивать частоту тока со стандартных 50 Гц до 60–80 кГц. Благодаря тому, что на выходе такого устройства регулировке подвергается высокочастотный ток, для этого можно эффективно использовать компактные трансформаторы. Увеличение частоты тока происходит в той части электрической схемы инвертора, где расположен контур с мощными силовыми транзисторами. Как известно, на транзисторы подается только постоянный ток, для чего и необходим выпрямитель на входе аппарата.

В общих чертах, принцип работы инвертора выглядит так:

- переменный ток с частотой 50 Гц из обычной электрической сети поступает на выпрямитель, где происходит его преобразование в постоянный;
- после выпрямителя постоянный ток сглаживается при помощи специального фильтра;
- из фильтра постоянный ток поступает непосредственно на инвертор, в задачу которого входит опять преобразовать его в переменный, но уже с более высокой частотой;
- после этого при помощи трансформатора понижают напряжение переменного высокочастотного тока, что дает возможность увеличить его силу.

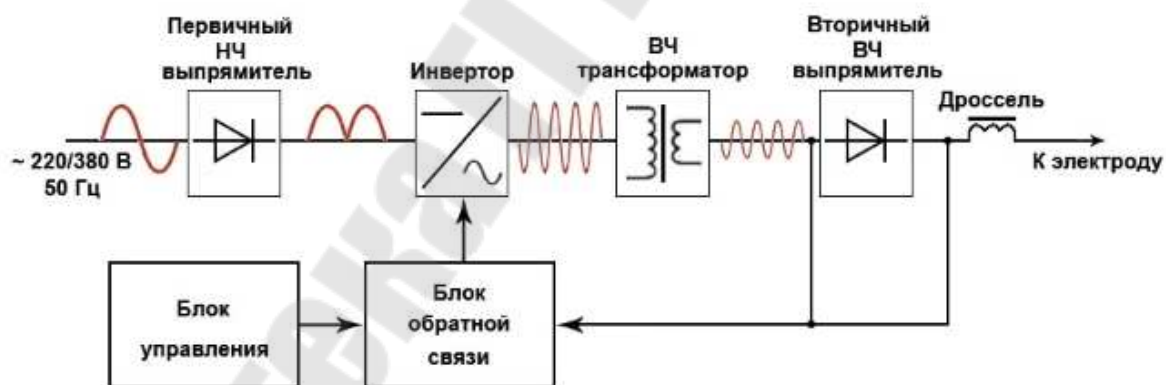


Рис. 5.6. Электрическая схема инверторного преобразователя, используемого в качестве источника сварочного тока

## Основные металлургические процессы в сварочной ванне

**Сварочная ванна** представляет собой относительно небольшой объем расплавленного металла, находящегося в контакте с газовой атмосферой дуги, со слоем расплавленного шлака и твердым холодным основным металлом. Химический состав ванны определяется со-

ставом электрода и основного свариваемого металла, долей их участия в образовании шва. Metallургические процессы в сварочной ванне протекают в соответствии с основными закономерностями металлургии, но с более высокой скоростью и в течение короткого времени существования ванны.

*Атмосфера дуги* состоит из смеси газов:  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO$  и  $CO_2$ , паров воды, металлов и шлаков, которые попадают из окружающей среды, сварочных материалов и флюсов. Кислород окисляет элемент, составляющий основу расплавленного металла, при сварке сталей – Fe. Образующийся оксид железа FeO растворяется в ванне и окисляет примеси и легирующие элементы, обладающие большим химическим сродством к кислороду: Si, Mn, Ti, Cr, Cu и др., которые переходят в шлак. Оксид углерода выделяется в атмосферу.

Азот растворяется в расплавленном металле. При содержании выше предела растворимости он образует нитриды. Азот может образовывать нитриды и с легирующими элементами, содержащимися в ванне.

Водород также растворяется в расплавленном металле. С рядом металлов может образовывать гидриды (Ti, V, Nb и др.).

Образующиеся в шве оксиды, нитриды, гидриды снижают прочностные и пластические свойства шва. Азот, водород и угарный газ CO способствуют образованию пор в сварочном шве.

Для предотвращения отрицательного влияния газов применяют различные способы защиты дуги и сварочной ванны (защитные газы, флюсы, обмазки электродов, вакуум). Расплавленный металл ванны взаимодействует со шлаками, образующимися при расплавлении покрытия электродов и флюсов. При взаимодействии со шлаками происходит раскисление металла сварочной ванны, удаление вредных примесей, а также легирование шва при необходимости придания ему определенных свойств.

Кристаллизация сварного шва начинается от границ оплавленного основного металла и протекает путем роста столчатых кристаллов к центру шва.

### **Структурные превращения в зоне термического влияния сварного шва**

На участках основного металла, прилегающих ко шву, под действием нагрева происходят фазовые и структурные превращения: сплавление границ зерен, рост зерна, образование закалочных структур и др. Характер и завершенность процессов определяются темпе-

ратурой нагрева, составом сплава, скоростью охлаждения. **Под зоной термического влияния (ЗТВ)** понимается участок около шовной зоны, претерпевший структурные превращения в результате термического воздействия. Различают следующие зоны:

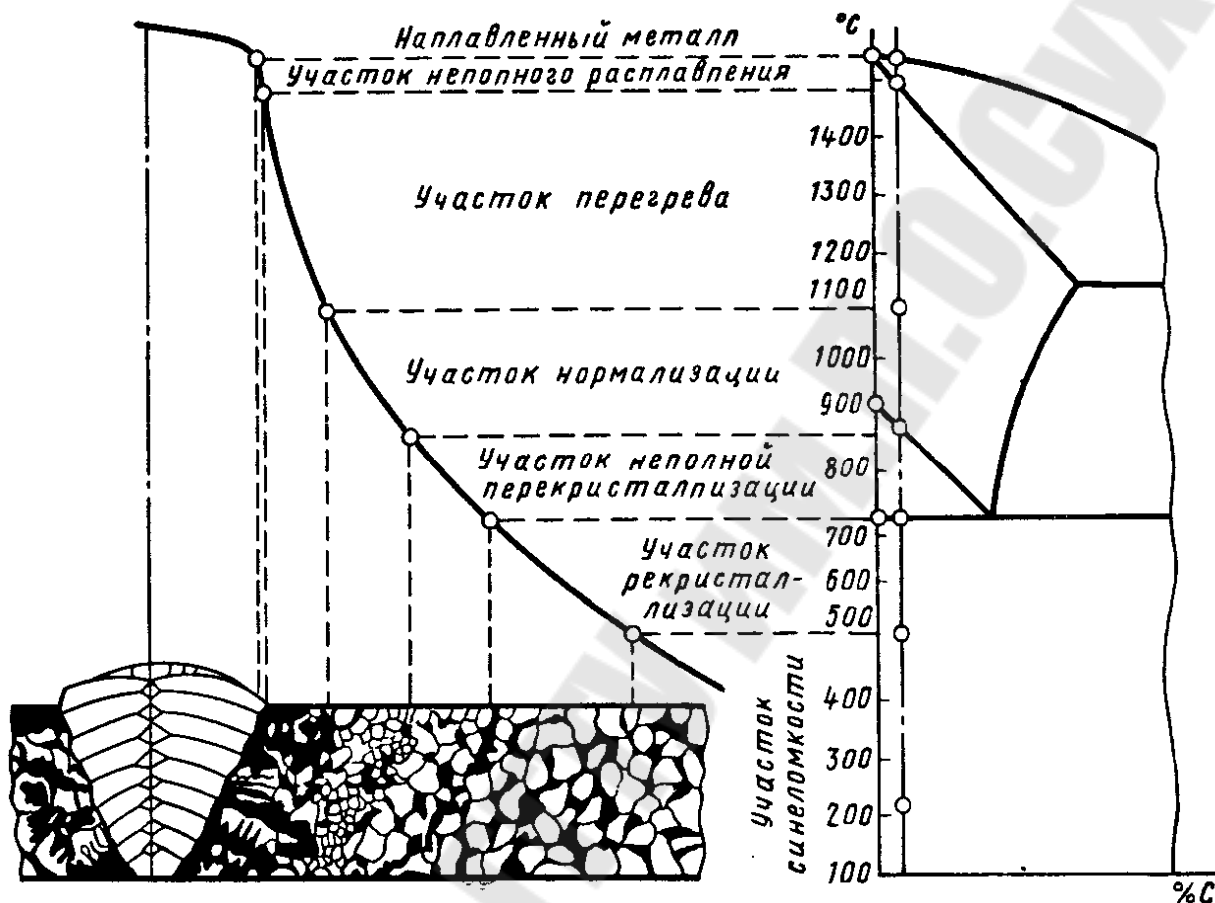


Рис. 5.7. Структура зоны термического влияния сварочного шва

– *Участок наплавленного металла.* В данной зоне наблюдается дендритное строение крупных кристаллов.

– *Участок неполного расплавления,* в котором наблюдается частичное оплавление зерен основного металла. В этих участках зачастую возникают усталостные трещины и зарождается коррозия.

– *Участок перегрева.* Здесь температура близка к  $0,8T_{пл}$  и происходит рост зерна. При резком охлаждении средне – и высокоуглеродистых сталей возможно образование закалочных структур с потерей пластичности и увеличением хрупкости.

– *Участок нормализации (перекристаллизации).* В этой зоне возникают наиболее благоприятные условия для образования мелкозернистой структуры.

– *Участок неполной перекристаллизации*, в котором наблюдаются как мелкие зерна, испытавшие полиморфное превращение, так и крупные, образовавшиеся при рекристаллизации.

– *Участок рекристаллизации*, отличающийся структурой с увеличенным зерном.

Размеры зоны термического влияния и ее отдельных участков зависят от толщины свариваемых заготовок, их химического состава, способа и режима сварки. Как правило, механические и эксплуатационные характеристики сварного шва ниже чем у основного металла.

### 5.3.1.1. Ручная дуговая сварка (РДС)

РДС выполняют сварочными покрытыми электродами, которые вручную подают в зону сварки и перемещают вдоль соединяемых заготовок (рис. 5.8). В процессе сварки дуга 5 горит между стержнем электрода 7 и основным металлом 1. Стержень электрода плавится и расплавленный металл каплями стекает в сварочную ванну 9. Вместе со стержнем плавится облицовочное покрытие электрода 6, образуя защитную газовую атмосферу вокруг дуги 8 и жидкую шлаковую ванну 4 на поверхности расплавленного металла. По мере движения электрода вдоль заготовки сварочная ванна 9 затвердевает, образуя сварочный шов 3. Жидкий шлак после остывания образует твердую шлаковую корку 2.

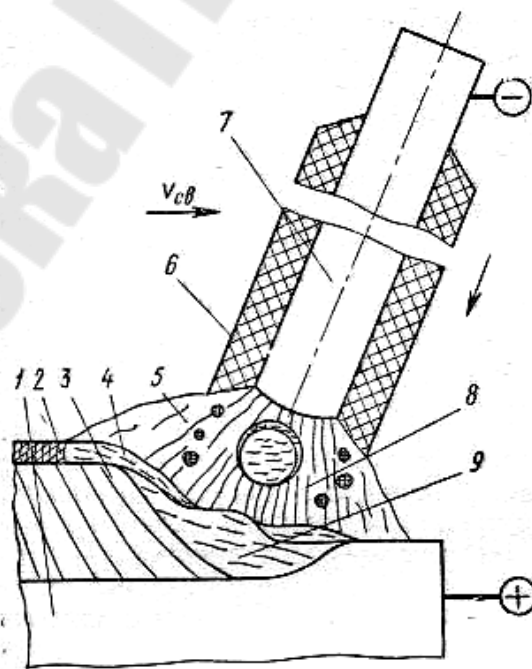


Рис. 5.8. Схема ручной дуговой сварки

**Сварочные электроды** представляют собой проволочные стержни с нанесенными на них покрытиями. В состав покрытия вводят ионизирующие, газообразующие, стабилизирующие, шлакообразующие, раскисляющие, легирующие и связующие ингредиенты.

Электроды классифицируют по назначению и виду покрытия. По назначению они подразделяются на 5 классов: для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей имеющих предел прочности ( $\sigma$ )<sub>в</sub> до 600 МПа, легированных конструкционных сталей с  $\sigma$ <sub>в</sub> > 600 МПа, легированных жаропрочных сталей, высоколегированных сталей с особыми свойствами и для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. По виду покрытия электроды подразделяются на электроды с кислым, рутиловым, основным и целлюлозным покрытием.

**Режим сварки** определяется диаметром электрода и силой сварочного тока. Диаметр электрода выбирают в зависимости от толщины свариваемых изделий, а силу сварочного тока – от диаметра и марки электрода. Чем толще свариваемые детали, тем выше должна быть сила сварочного тока. Диаметр электрода выбирают исходя из толщины свариваемых листов стали  $\delta$  при стыковом шве и катета  $k$  – при угловом. Рекомендуемые значения приведены ниже

$\delta$ (k), мм	1...2	3...5	4...10	12...24	30 и более
$d_э$ , мм	2...3	3...4	4...5	5...6	6...8.

Сила сварочного тока определяется по формуле

$$I_{св} = k \cdot d_э \text{ (А/мм)},$$

где  $k$  – опытный коэффициент (40...60) для электродов из низкоуглеродистых сталей, (35...40) – из высоколегированных;  $d_э$  – диаметр стержня электрода.

### **Виды сварных соединений и швов**

Различают следующие **типы сварных соединений**: стыковые, угловые, тавровые и нахлесточные (рис. 5.9). **Стыковые** представляют собой соединения двух элементов, примыкающих друг к другу торцовыми поверхностями. При **тавровом** соединении торец одного элемента примыкает под углом к боковой поверхности другого и приварен угловым швом. В **нахлесточном** – сваренные угловым швом

элементы расположены параллельно и частично перекрывают друг друга. *Угловым* называется соединение двух элементов, расположенных под углом и сваренных в месте примыкания их краев.

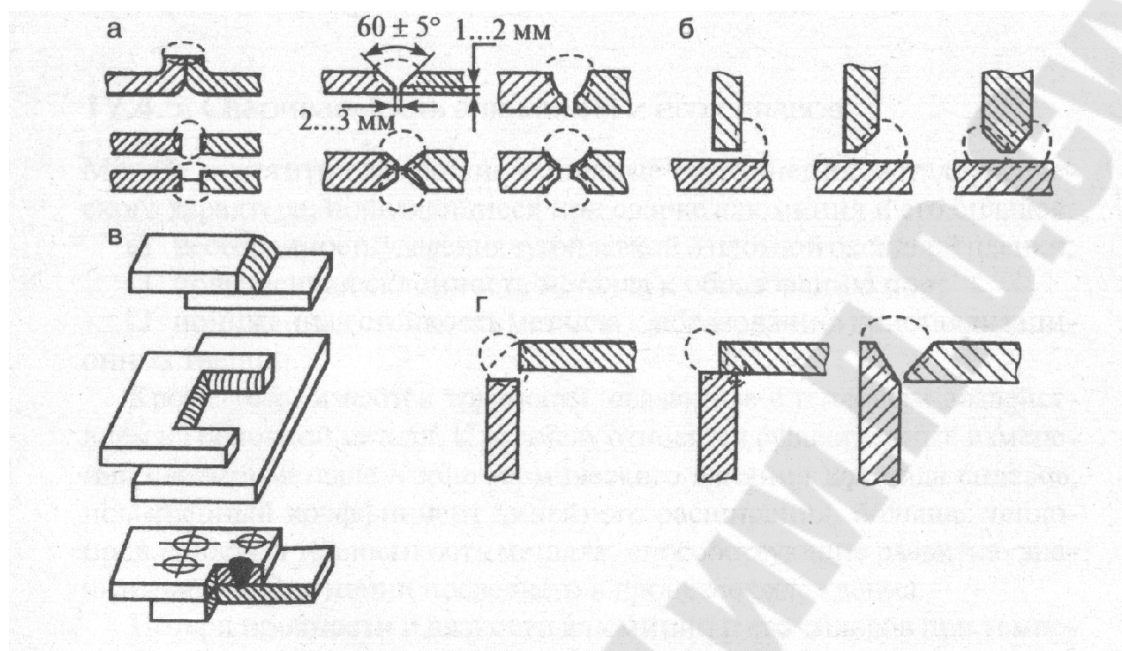


Рис. 5.9. Типы сварных соединений: а – стыковое; б – тавровое; в – нахлесточное; г – угловое

Соединения встык предпочтительнее с точки зрения экономии металла и лучшей работоспособности. При сварке тонких изделий кромки заготовок загибают для усиления шва. При толщине до 8 мм сварку можно производить без разделки кромок заготовок при зазоре между ними до 2 мм. Металл толщиной 8...15 мм сваривают с односторонней V-образной разделкой кромок, при толщине 15...30 мм – с X-образной двусторонней и более 30 мм – с U-образной одно – и двусторонней разделкой кромок. Металл толщиной свыше 10 мм сваривается многослойным швом.

**По расположению в пространстве швы подразделяются** на: нижние, горизонтальные, вертикальные и потолочные.

**По протяженности** швы бывают сплошные и прерывистые.

**По положению относительно действующего усилия** швы подразделяются на: лобовые, фланговые и косые (относятся к угловым швам нахлесточных соединений). *Лобовой шов* перпендикулярен действующему усилию. *Фланговые швы* расположены параллельно усилию, а *косые* находятся под углом к нему (рис. 5.10).



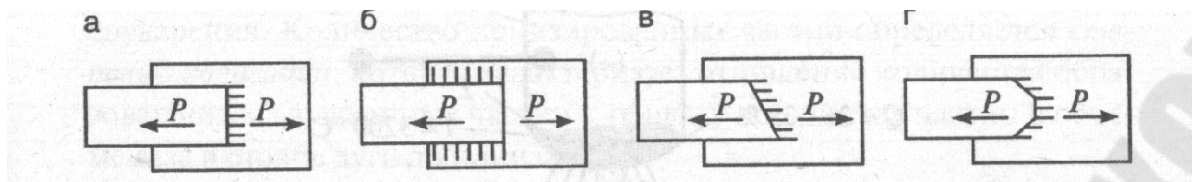


Рис. 5.10. Расположение швов относительно действующего усилия  $P$ : а – лобовой; б – фланговый; в – косой; г – сочетание лобового с косыми

**По протяженности** швы бывают непрерывными и прерывистыми. А **по объему наплавленного металла** – однослойными и многослойными.

**Производительность процесса сварки**  $\Pi_{св}$  определяется количеством наплавленного металла  $G_n$  в единицу времени и зависит от силы сварочного тока  $I_{св}$  и коэффициента наплавки  $\alpha_n$  применяемого электрода:

$$\Pi_{св} = \alpha_n \cdot I_{св}, (\text{г/ч}),$$

$$\alpha_n = G_n / (I_{св} \cdot t), (\text{г/Ач}).$$

Напряжение дуги изменяется в пределах 16...30В. Скорость сварки 5...7 м/ч в зависимости от толщины свариваемых заготовок. Коэффициент наплавки при сварке углеродистых и низколегированных конструкционных сталей 8...14 г/(А·ч).

Ручной дуговой сваркой соединяют детали толщиной 2...30 мм из стали, чугунов и цветных металлов. РДС удобна при выполнении коротких криволинейных швов в любых пространственных положениях и при сварке в труднодоступных местах. Она обеспечивает высокое качество сварки, но производительность невысока. Качество сварного соединения в значительной степени зависит от квалификации сварщика

### 5.3.1.2. Автоматическая дуговая сварка под флюсом

При данном виде сварки *электрическая дуга горит между изделием и электродной непокрытой проволокой, а плавильное пространство защищено слоем флюса толщиной 30...50 мм* (рис. 5.11). Флюс 5 обеспечивает стабилизацию дуги 10, препятствует разбрызгиванию металла, обеспечивает защиту сварочной ванны 9 от воздействия ки-

слорода и азота воздуха, обеспечивает теплоизоляцию и качественное формирование шва 7. Электродная проволока 3 из кассеты специальным роликовым механизмом 2 подается в зону сварки. Флюс 5 подается в зону сварки из бункера через питатель 1. Под действием теплоты, выделяющейся при горении дуги, флюс плавится. В области горения дуги образуется полость, заполненная парами металла и газами 10. Их давление поддерживает свод из расплавленного флюса 4 над сварочной ванной из жидкого металла. По мере автоматического перемещения дуги в направлении сварки происходит кристаллизация металла и образуется сварной шов, покрытый шлаковой коркой 6. Не расплавившийся флюс отсасывается и поступает опять в бункер. Источник питания подключается к изделию 8 и токопроводу 1, по которому скользит электродная проволока перед погружением в слой флюса.

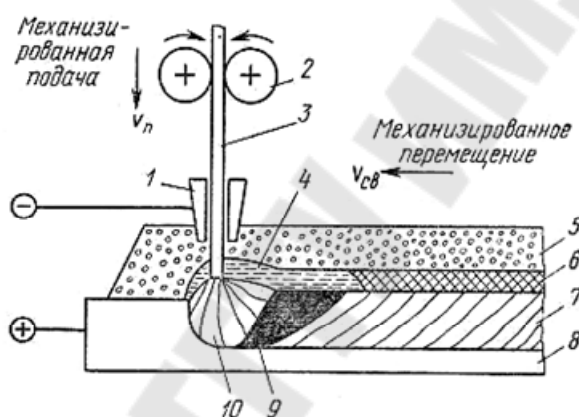


Рис. 5.11. Схема автоматической дуговой сварки под флюсом

*Преимущества автоматической дуговой сварки под флюсом перед ручной сваркой:*

1. Высокое качество сварки, стабильные размеры и форма сечения шва, отсутствие перерывов в процессе сварки, вызываемой сменой электродов при ручной сварке.

2. Высокая производительность процесса (в 15...20 раз выше, чем при ручной), высокая плотность тока 50...200 А/мм<sup>2</sup> (вместо 10...20 А/мм<sup>2</sup> при ручной), значительно большая глубина проплавления без раздела кромок. Коэффициент наплавки составляет 18...20 г/А·ч.

3. Меньше потери металла из-за разбрызгивания (1...2 % вместо 10). Высокий КПД дуги – до 0,90...0,95. Меньше выделение газов.

Сварку выполняют либо самоходными сварочными тракторами, либо неподвижными головками, под которыми перемещается изде-

лие. Скорость сварки 30...50 м/ч и выше, используется проволока диаметром 1...6 мм, сила тока 150...200 А, напряжение на дуге 22...55 В. К недостаткам данной сварки можно отнести возможность получения швов только в нижнем положении.

### 5.3.1.3. Дуговая сварка в защитных газах

*Особенность дуговой сварки в защитных газах* – физическая изоляция сварочной дуги и нагретого до высокой температуры основного и электродного металлов от вредного воздействия воздуха защитным газом. Местная защита создается потоком газа, истекающего из сопла, концентрично расположенного относительно сварочного электрода. Сварка *выполняется плавящимися и неплавящимися электродами*. По степени механизации различают автоматическую, механизированную и ручную сварки.

Для газовой защиты используют инертные газы (аргон, гелий) и активные (углекислый газ, водород), а также смеси газов (аргон с  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  с кислородом, аргон с кислородом и др.). Внутренний поток создается обычно аргоном, а наружный –  $\text{CO}_2$ . Этот способ используют для сварки химически активных металлов (Ni, Al, Mg и др), а также для сварки высоколегированных сталей. Сварку в среде  $\text{CO}_2$  применяют для соединения конструкционных углеродистых сталей. Защитные газы поставляют в баллонах емкостью 40 л под давлением 15 МПа (Ar, He) и 6...7 МПа ( $\text{CO}_2$ ).

*Сварка в среде  $\text{CO}_2$*  обеспечивает высокую производительность и низкую стоимость. Недостаток – повышенное разбрызгивание металла до 10%, не всегда удовлетворительный вид шва. Сварку выполняют плавящимся электродом на постоянном токе обратной полярности (плюс на электроде), т.к. при переменном токе низкая устойчивость дуги. Диаметр проволоки составляет 0,5...3 мм, напряжение на дуге в пределах 20...30 В, скорость сварки 20...80 м/ч, расход защитного газа 6...25 л/мин. Используют проволоку с повышенным содержанием раскисляющих элементов Si и Mn. Сварка в среде  $\text{CO}_2$  производится на повышенных плотностях тока (80...100 А/мм<sup>2</sup>). Применяется этот метод для сварки конструкций из углеродистых и низколегированных сталей (газо – и нефтепроводы, корпуса судов и др.) в любом пространственном положении. Сварка легко механизуется. Для устранения окисления свариваемых металлов применяют свароч-

ную проволоку Св08Г2С и Св08ГС легированную марганцем и кремнием.

**Аргонодуговая сварка** выполняется плавящимся или неплавящимся электродами. При сварке *неплавящимся электродом* для заполнения сварного шва может осуществляться ручная и автоматическая подача присадочного материала. Ручную сварку вольфрамовым электродом применяют для соединения заготовок толщиной до 4 мм без разделки кромок.

Сварка *плавящимся электродом* (рис. 5.12) может быть механизированной или автоматической. Сварка ведется на постоянном токе прямой полярности (плюс на изделии), т.к. больше тепла выделяется на аноде. Она применяется для соединения заготовок толщиной 0,8...6 мм. При прямой полярности дуга горит устойчиво при напряжении 10...15 В и минимальном токе 10 А, что обеспечивает возможность сварки тонколистовых заготовок, толщиной менее 1 мм. Для

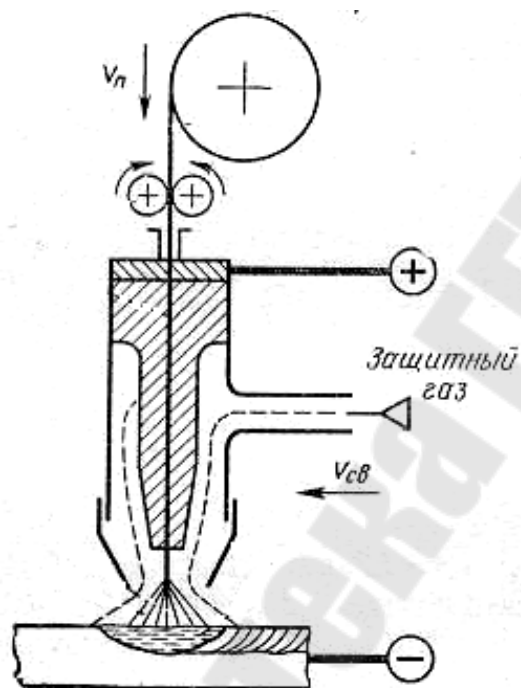


Рис. 5.12. Схема аргонодуговой сварки.

сварки листового металла толщиной до 0,2 мм применяют автоматическую сварку в импульсном режиме.

Обратная полярность наиболее эффективно используется для разрушения оксидной пленки на поверхности металла.

Для сварки Al, Mg, Be используют переменный ток при диаметре электрода 3 мм сила тока составляет 100...160 А, напряжение 12...16 В. Аргонодуговую сварку плавящимся электродом диаметром 0,6...3 мм применяют для соединения деталей из цветных металлов и легированных сталей. Сварка происходит капельным или струйным пере-

носом металла с электрода в сварочную ванну. Плотность тока выбирают 60...120 А/мм<sup>2</sup> при сварке сталей и 70 А/мм<sup>2</sup> для алюминия.

В защитный газ часто добавляют небольшое количество кислорода – Ar +10%O<sub>2</sub>, в CO<sub>2</sub> +5%O<sub>2</sub>. Это приводит к уменьшению по-

верхностного натяжения металла и снижению критической плотности тока, при которой мелкокапельный перенос переходит в струйный.

Сварка в среде защитных газов позволяет хорошо защитить сварочную ванну от контакта с кислородом. Процесс высокопроизводителен, не требует высокой квалификации, необходимой для ручной дуговой сварки. Единственный недостаток – разбрызгивание до 10% металла сварочной проволоки, которое неминуемо происходит в результате опережающей подачи сварочной проволоки. Проволока с определенной периодичностью выдвигается до касания со сварочной ванной, в результате чего происходит быстрый разогрев и расплавление короткозамкнутой перемычки электрода с разбрызгиванием капель металла.

Автоматическая сварка ведется обычно с помощью сварочных тракторов АДПГ-500, АДГ-500 и др.. Полуавтоматическая – на полуавтоматах А-547, ПДГ-500 и др. Механизированная сварка осуществляется на сварочных постах, включающих сварочный выпрямитель, кассету с проволокой, механизм подачи проволок, баллон с газом, гибкий шланг и горелку.

### **5.3.2. Электрошлаковая сварка**

При этом способе сварки *теплота, необходимая для плавления основного и электродного металла, выделяется в расплавленном флюсе (шлаковой ванне) при прохождении через него электрического тока* (рис.5.13). Источник переменного или постоянного тока подключают к сварочному электроду 4 и изделию 8. Возбуждается дуга между электродом и вспомогательной планкой, которая расплавляет флюс и затем гаснет, при этом электрод погружается в расплавленный флюс 3, обладающий электропроводностью. Под действием теплоты, выделяемой при прохождении тока, ванна разогревается до 2000 °С, обеспечивая плавление основного и электродного металлов. Шлаковая 3 и металлическая 2 ванны удерживаются от вытекания плотно прижатыми, охлаждаемыми водой ползунами 7, которые по мере заполнения пространства между соединяемыми заготовками перемещаются вверх.

Электрошлаковая сварка выгодна при толщине свариваемых деталей более 25 мм. Она обеспечивает за один проход соединение металла практически любой толщины, при этом не требуется разделки кромок. Преимуществом является и малый расход флюса (около 3 %

от массы наплавленного металла), хорошее удаление вредных примесей и газов из металла шва. Однако можно выполнять только вертикальные швы. Недостатком также является значительный перегрев металла в околошовной зоне, что приводит к росту зерна и снижению пластичности металла.

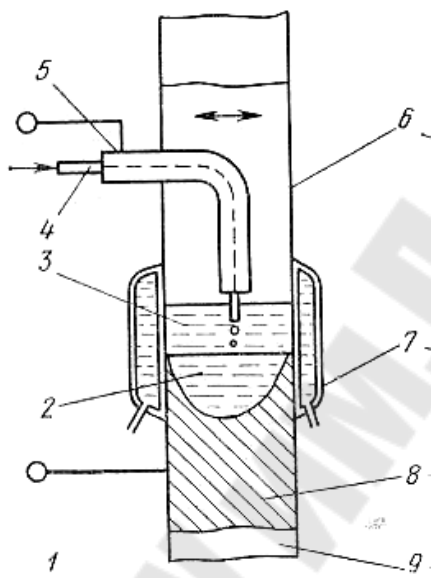


Рис. 5.13. Схема электрошлаковой сварки

#### 4.2.3. Плазменная сварка

При плазменной сварке в качестве источника теплоты используют направленный поток частично или полностью ионизированного газа, имеющего температуру 10000...20000 °С.

Плазму получают в плазменных горелках (плазмотронах), пропуская газ через столб сжатой дуги. Дуга горит в узком канале сопла горелки, через который продувается газ. Сжатие дуги приводит к увеличению плотности энергии и температуры. Газ, проходя через столб дуги, нагревается, ионизируется и выходит из сопла в виде высокотемпературной плазменной струи. В качестве плазмообразующих газов используют аргон, гелий, водород, углекислый газ, а также смеси газов.

Существуют **плазменные горелки** прямого и косвенного действия. В *плазмотронах косвенного действия* дуга возбуждается и стабильно горит между электродом и охлаждаемым соплом.

В *плазмотронах прямого действия* (рис. 5.14) одним из электродов является изделие. В этом случае плазменная струя потоком газа выдувается из сопла. Воздух или плазмообразующий газ, пройдя

через канал внутри электродного узла и механизм закрутки образуют вихревой поток, закрученный вдоль продольной оси электрода плазмотрона и выходящий через геометрически соосный с ним канал сопла.

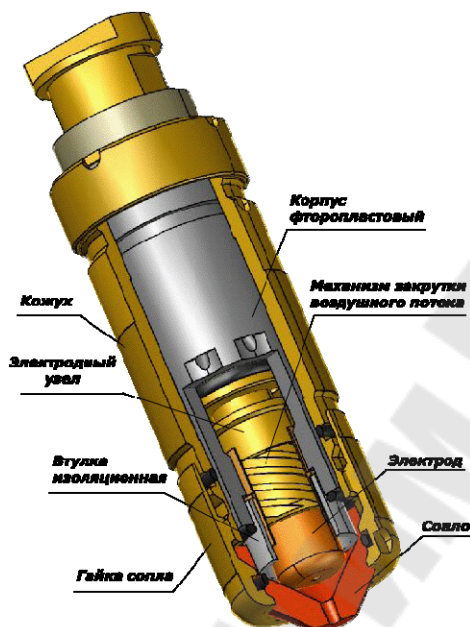


Рис. 5.14. Конструкция плазмотрона прямого действия

Работа плазмотрона происходит следующим образом: генератор высокого напряжения (осциллятор) создаёт электрический потенциал в промежутке электрод-сопло плазмотрона, необходимый для возникновения искрового разряда. Этот разряд поджигает вспомогательную (дежурную) электрическую дугу, которая горит между электродом и соплом плазмотрона и выдувается наружу потоком воздуха через канал сопла. Ток дежурной дуги определяется токоограничивающим резистором  $R$  и составляет обычно 20—60 А. Дежурная дуга, коснувшись металла, шунтирует ограничивающий резистор  $R$  и замыкается на металл, минуя контакта с соплом. Установка переходит в режим прямой рабочей дуги. Поток закрученного по спирали воздуха стабилизирует и сжимает столб рабочей электрической дуги, не позволяя ей касаться стенок канала сопла плазмотрона. Сварка осуществляется на переменном или постоянном токе прямой полярности. Плазменная сварка прямой дугой используется для сварки высоколегированных сталей, сплавов титана, никеля, молибдена вольфрама и др. материалов. По сравнению с аргонодуговой сваркой отличается большой проплавляющей способностью (до 10 мм без разделки кромок) и использования присадочного материала.

Плазмотроны косвенной дуги имеют ограниченную тепловую мощность и применяются для сварки и резки тонких металлических листов и неэлектропроводных материалов, а также для напыления тугоплавких материалов на поверхности.

При плазменной сварке ниже тепловое влияние дуги на свариваемый металл и меньше тепловые деформации. Обеспечивается высокая стабильность горения и качество сварного шва. Возможна сварка очень тонких листов от 0,025 до 0,8 мм на токах 0,5...10А. А. Недостаток плазменной сварки – недолговечность горелок вследствие частого выхода из строя сопел и электродов.

### 5.3.4. Лучевые способы сварки

Все более широкое применение находят лучевые способы сварки, к которым относятся электронно – лучевая и лазерная сварки.

При электронно-лучевой сварке используется кинетическая энергия электронов, быстро движущихся в вакууме. При соударении с поверхностью металла их кинетическая энергия переходит в тепловую, которая используется для расплавления металла. Температура в зоне соударения достигает до 6000°С.

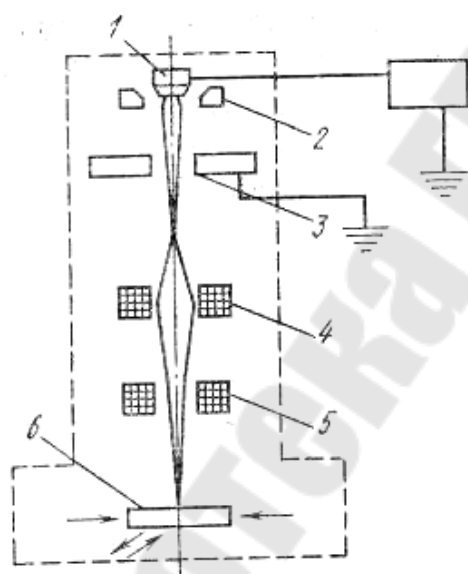


Рис. 5.15. Схема электронно-лучевой сварки

Сварка осуществляется в вакуумной камере при разрежении  $133 \cdot 10^{-4}$  Па. В качестве источника потока электронов используют электронную пушку (рис.5.15), позволяющую получать луч с большой плотностью энергии до  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> (в 5000 раз больше, чем при РДС) и фокусировать луч на поверхности изделия в пятне диаметром менее 1 мм. Металл мгновенно нагревается до температуры кипения и испаряется, что обеспечивает большую глубину проплавления, в 20 раз превышающую диаметр пучка.

Поток электронов создается катодом электронной пушки 1, собирается в пучок формирующим электродом 2 и ускоряется под действием разности потенциалов между катодом 1 и анодом 3, которая составляет 20...150 кВ. Магнитно-



оптическая система 4 фокусирует поток электронов, а магнитная отклоняющая система 5 перемещает его в зоне сварки. Обычно перемещается деталь при неподвижном луче.

Высокая концентрация теплоты в пятне нагрева, незначительная ширина шва и нагретой зоны основного металла способствуют резкому снижению деформаций сварного соединения, а также предотвращает окисление металла шва. Электронно-лучевую технологию применяют для сварки тугоплавких и химически активных металлов (W, Ta, Nb, Mo), при сварке деталей весьма малых от 0,02 мм и больших до 200 мм толщин. К недостаткам этой сварки следует отнести сравнительно высокую стоимость оборудования, ограничение размеров свариваемых изделий габаритами вакуумной камеры, невысокая производительность, а также необходимость обеспечения биологической защиты обслуживающего персонала.

**Лазерная сварка** использует энергию светового луча, получаемого от оптического квантового генератора (ОКГ). С помощью ОКГ можно получать интенсивные и остронаправленные пучки света и концентрировать энергию на очень малые площадки, равные тысячным долям миллиметра.

Для сварки используют твердотельные и газовые лазеры. Газовые обладают более высокой выходной мощностью и работают в непрерывном и импульсном режимах. С помощью оптических систем пучок света можно передавать на большие расстояния, поворачивать, фокусировать. Возможность получать высокую плотность энергии в пятне нагрева, точно дозировать энергию является важным преимуществом лазерной сварки. Можно производить сварку через прозрачные оболочки. Технология позволяет выполнять сварку на воздухе, в защитных газах, в вакууме листов толщиной до 15 мм.

Важными областями применения лазерной сварки являются микроэлектроника, радиоэлектроника

### **5.3.5. Газовая сварка**

При газовой сварке *в качестве источника теплоты используют газовое пламя, образующееся при сгорании горючего газа в атмосфере кислорода.* Применяют различные горючие газы – ацетилен, водород, природные газы, пропан, бутан, пары бензина. Самую высокую температуру 3200 °С обеспечивает ацетилен. Для получения пламени из баллонов, снабженных газовыми регуляторами давления, ацетилен

и кислород подают в горелку (рис. 5.16). Для повышения интенсивности и полноты сгорания, в зону газового факела подается технически чистый кислород.

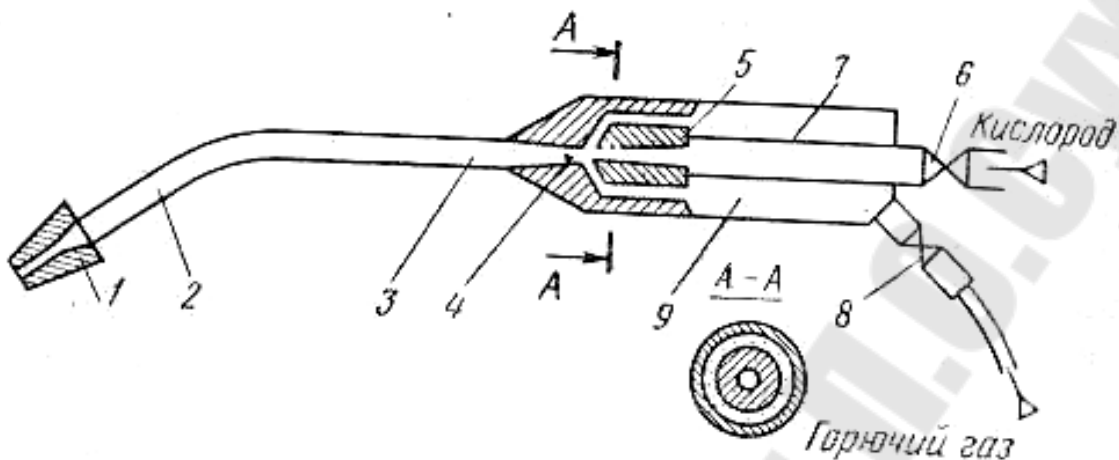


Рис. 5.16. Устройство газовой горелки

Применяются в основном горелки инжекторного типа, в которых кислород, подаваемый под давлением 0,1...0,4 МПа, истекает из сопла с большой скоростью, создавая разрежение в камере 4, всасывает ацетилен в смесительную камеру 3. Здесь образуется горючая смесь, поступающая через наконечник 2 к выходному отверстию мундштука 1. Сгорание смеси происходит в сварочном пламени на выходе из мундштука.

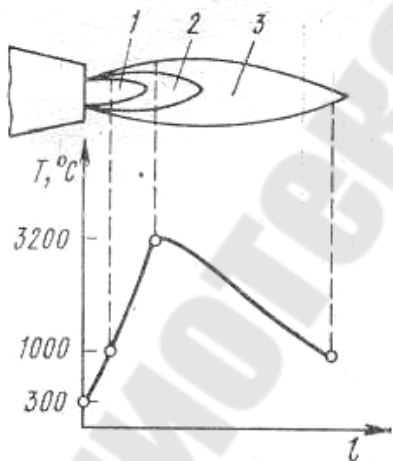
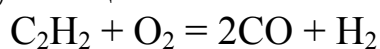


Рис. 5.17. Схема газового пламени

Эффективная мощность пламени зависит от расхода газа. Тепловую мощность пламени регулируют сменными наконечниками горелки с разным расходом газа. Ацетилено-кислородное пламя состоит из трех зон (рис. 5.17): ядро пламени 1, средняя зона 2, факел пламени 3. В зоне 1 смесь нагревается до температуры воспламенения газовой смеси, в зоне 2 происходит первая стадия горения ацетилена за счет кислорода, поступающего из баллона.



Зона 2 имеет самую высокую

температуру, обладает восстановительными свойствами и является основной рабочей зоной. В зоне 3 протекает вторая стадия горения ацетилена за счет атмосферного кислорода.



Образующиеся  $\text{CO}_2$  и пары воды при высоких температурах окисляют поверхность металлов, поэтому эту зону называют *окислительной*.

В зависимости от соотношения (по объему) ацетилена и кислорода в горючей смеси *пламя может быть нормальным* ( $\beta = V_{\text{O}}/V_{\text{CH}} = 1 \dots 1,3$ ), *окислительным*  $\beta$  больше 1,3 и *науглероживающим*  $\beta$  менее 1,0. Регулировка производится по цвету: окислительное с голубоватым оттенком, науглероживающее с красноватым оттенком и коптит. Окислительное пламя используют для сварки латуней. Науглероживающее – для сварки чугунов. Нормальным пламенем сваривают большинство сталей. Для создания сварочного шва нужного объема в зону горения пламени подается присадочный материал (рис. 5.18).

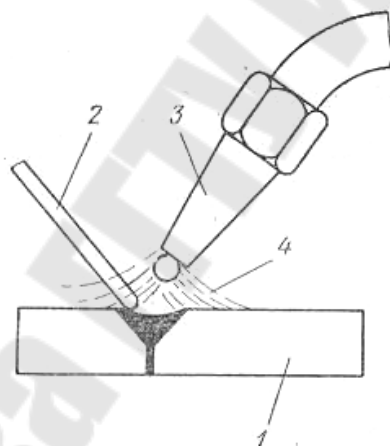


Рис. 5.18. Схема газовой сварки: 1 – свариваемый материал; 2 – присадочный пруток; 3 – наконечник газовой горелки; 4 – газое пламя

Газовое пламя является рассредоточенным источником теплоты, оно нагревает металл медленнее и более плавно, чем сварочная дуга. Поэтому этот вид сварки имеет преимущества при сварке тонкостенных материалов. Газовую сварку применяют для сварки изделий из стали и цветных металлов толщиной до 3 мм, при заварке дефектов литья из серого чугуна и бронзы. При сварке цветных металлов и сплавов используют флюсы, наносимые в зону шва в виде паст или порошков. Способ прост, отсутствуют электрические источники, по-

этому несмотря на меньшую производительность метод широко используется в народном хозяйстве.

При сварке тонкого металла во избежание прожогов листов применяют левый способ сварки (горелка движется справа налево), при котором пламя горелки нагревает кромку и присадочный металл. При правом способе горелка движется впереди присадочной проволоки (слева направо), пламя направляется на шов, защищая его от окисления. Второй способ более экономичен, производительность его выше на 20...25%. Диаметр присадочной проволоки выбирается в соответствии с толщиной  $S$  основного металла. При левом способе  $d = 0,5S + 1$ , при правом  $d = 0,5S + 2$ . Материал проволоки должен быть близок по химическому составу к основному металлу.

### 5.3.6. Термическая резка металлов

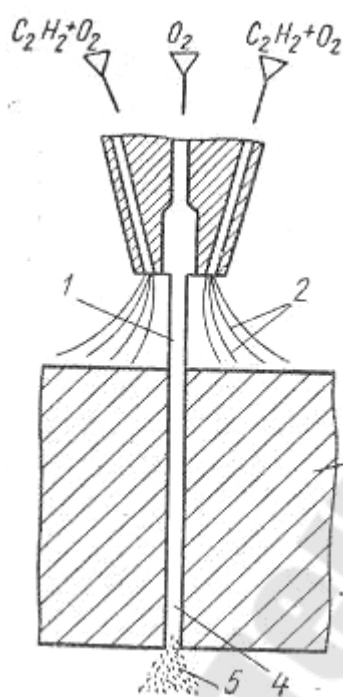
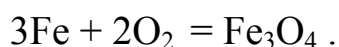


Рис. 5.19. Схема газокислородной резки

**Газокислородная резка** заключается в сжигании металла в струе кислорода и удалении струей образующихся оксидов (рис. 5.19).

Для начала горения металл подогревают ацетилено - кислородным пламенем 2 до 1000...1200 °С, а затем направляется струя режущего кислорода 1. Нагретый металл 3 начинает гореть и образующиеся оксиды металла струей 4 удаляются из зоны реза 5. Процесс идет в соответствии с уравнением



Для обеспечения нормального процесса резки металл должен отвечать следующим требованиям:

- температура плавления металла должна быть выше температуры горения металла в кислороде;
- температура плавления оксидов металла должна быть ниже его температуры плавления;
- количество тепла, выделяющегося при горении металла, должно быть достаточно для поддержания непрерывного процесса резки;

- образующиеся оксиды должны быть достаточно жидкотекучими.

Практически этим свойствам удовлетворяют железо, низкоуглеродистые и низколегированные стали. Различают разделительную резку, поверхностную и кислородным копьем.

**При разделительной резке** режущая струя направляется перпендикулярно к поверхности металла и прорезает всю его толщину. Обычно она используется при раскрое металла.

**При поверхностной резке** режущая струя под очень малым углом направляется к поверхности металла и обеспечивает грубую его строжку или обдирку.

**При резке кислородным копьем** к рукоятке резака прикрепляют стальную трубку, свободный конец которой прижимают к прожигаемому металлу. Конец трубки и заготовку подогревают сварочной дугой или горелкой и через трубку подают кислород. При этом конец трубки загорается и дальнейший подогрев уже не нужен. Копье прижимают к металлу и углубляют его. Этим методом выжигают круглые отверстия.

**Воздушно-дуговая резка** производится неплавящимся электродом, а расплавленный металл выдувается сжатым воздухом, подаваемым параллельно электроду. Применяют ее в основном для поверхностной обработки металла (создания углублений, канавок).

**Плазменно-дуговая резка** выполняется плазменной дугой или плазменной струей. При резке *плазменной дугой* металл выплавляется из полости реза направленным потоком плазмы, совпадающим с токоведущим столбом плазмотрона прямого действия. Этим способом можно резать высоколегированные стали, медные сплавы толщиной до 120 мм. *Плазменной струей* плазмотрона косвенного действия разрезают неэлектропроводные материалы (керамику), тонкие листовые материалы из стали, алюминия, меди, тугоплавких материалов.

## **5.4. Термомеханическая и механическая сварки**

### **5.4.1. Контактная сварка**

**Контактная сварка** относится к видам сварки с кратковременным нагревом места соединения без оплавления или с оплавлением и осадкой разогретых заготовок. Характерная особенность этих процес-

сов – пластическая деформация, в ходе которой формируется сварное соединение.

Рассмотрим сущность процесса на примере *стыковой сварки* (рис.5.20).

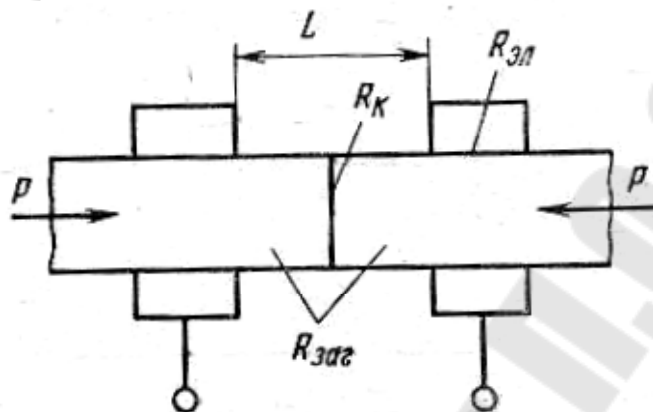


Рис. 5.20. Схема контактной стыковой сварки

Свариваемые заготовки закрепляют в зажимах (электродах) стыковой сварочной машины и сжимают осевой силой  $P$ . Электроды подсоединяют к сварочному трансформатору, при включении которого через заготовку протекает электрический ток. Под действием тока происходит нагрев деталей, причем наибольшее количество теплоты выделяется в месте сварочного контакта. Количество выделяемой теплоты  $Q$  определяется по закону Джоуля - Ленца

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t,$$

где –  $I$  – сварочный ток, А;  $R$  – полное сопротивление сварочного контура, Ом;  $t$  – время протекания электрического тока, с.

$$R = 2R_{эл} + 2R_{заг} + R_{к},$$

где –  $R_{эл}$  – электрическое сопротивление контакта между электродом и заготовкой;  $R_{заг}$  – сопротивление участков заготовок, по которым протекает ток;  $R_{к}$  – электрическое сопротивление контакта между заготовками.

Электрическое сопротивление  $R_{к}$  имеет наибольшую величину вследствие шероховатости поверхностей стыка, наличия оксидных пленок и загрязнений на свариваемых поверхностях. В результате в точках контакта металл разогревается до оплавления либо высокопластического состояния. При непрерывном сближении размягченный металл деформируется, поверхностные оксидные пленки разрушают-

ся и удаляются к периферии стыка, оплавляются новые точки, обеспечивая полное сближение поверхностей, т.е. их сварку. По типу сварного соединения различают сварку стыковую, точечную и шовную.

### Стыковая сварка

При стыковой сварке (рис. 5.20) заготовки свариваются по всей поверхности соприкосновения.

Различают стыковую сварку *сопротивлением и оплавлением*.

**При сварке сопротивлением** сначала сжимают заготовки силой  $P$ , а затем пропускают по ним электрический ток  $I$  (рис. 5.21a). После разогрева сварочного контакта прикладывается дополнительное усилие, обеспечивающее пластическое деформирование стыка заготовок, называемое *осадкой*, а сварочный ток отключается. Сварное соединение образуется в твердой фазе. Необходима при этом тщательная подгонка свариваемых поверхностей и очистка их от оксидных пленок. Применяют этот вид сварки для деталей простой формы (круг, квадрат) сечением до  $100 \text{ мм}^2$ , т.к. при больших сечениях возможна неравномерность прогрева стыка.

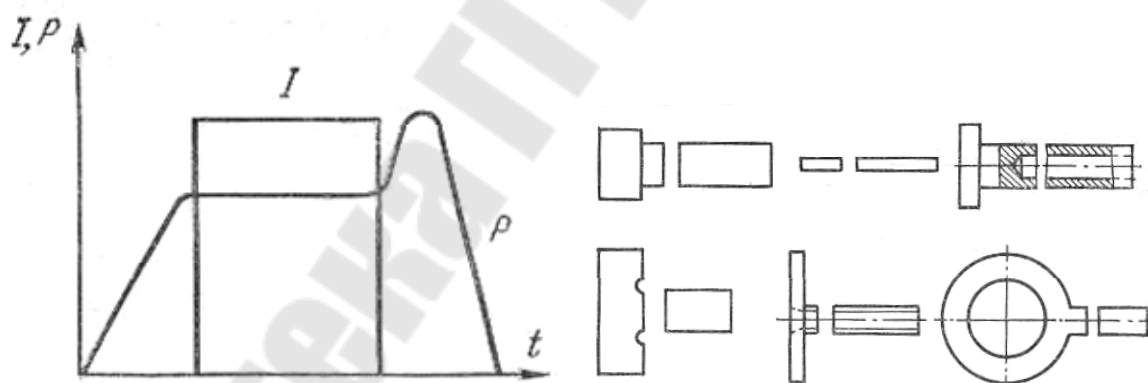


Рис. 5.21. Циклограмма стыковой сварки сопротивлением и типы сварных соединений.

**При сварке оплавлением** детали, закрепленные в зажимах сварочной машины, под небольшим усилием  $P$  медленно сближаются  $S$  при включенном сварочном трансформаторе  $I$  (рис.к 5.22). Ввиду малых пятен контакта (вследствие контакта по отдельным выступам контактирующих микро выступов шероховатостей и неровностей) на них возникает высокая плотность тока и поэтому происходит мгновенное расплавление выступов с образованием расплавленных пере-

мычек, которые под действием паров металла разрушаются и образуются новые. Далее сварку оплавлением проводят двумя методами: непрерывным и прерывистым.

*При непрерывном:* после первого касания заготовки продолжают сближать, обеспечивая равномерное оплавление всей поверхности стыка и осаживая его.

*При прерывистом* - после касания заготовки разъединяют и затем вновь сближают, быстро повторяя несколько циклов короткого замыкания, до достижения оплавления всего сечения. Затем выключают ток и сдавливают заготовку. Под давлением часть расплавленного металла вместе с окислами выдавливается из зоны сварки.

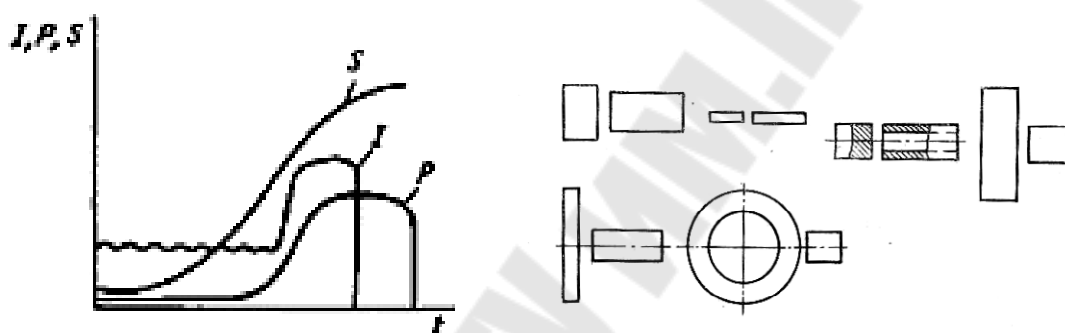


Рис. 5. 22. Циклограмма стыковой сварки оплавлением и виды сварных соединений

Сварка оплавлением позволяет получить наиболее однородное соединение с минимальным количеством включений оксидов и загрязнений, не требует тщательной подготовки стыков свариваемых поверхностей, позволяет сваривать детали любой конфигурации, различных сечений по форме и по площади сечения (до  $100000 \text{ мм}^2$ ), а также сваривать разнородные металлы (быстрорежущие и углеродистые стали, медные и алюминиевые сплавы). Контактная сварка оплавлением энергетически более выгодна, чем сварка сопротивлением.

### Точечная сварка

Точечную сварку применяют преимущественно при соединении листовых материалов. Свариваемые заготовки 1 собирают внахлестку, сжимают силой  $P$  между двумя медными водоохлаждаемыми электродами 2 и пропускают электрический ток. Так как медные электроды охлаждают водой, то интенсивный нагрев происходит



только в месте контакта свариваемых металлов. Металл расплавляется и появляется жидкое ядро, которое затвердевает после выключения сварочного тока, образуя сварную точку. Для исключения образования при кристаллизации пор и трещин, а также измельчения зерен металла сварочной точки, кристаллизацию ведут при сохранении первоначального давления (рис.5.23). При сварке сталей и других малопластичных сплавов в момент кристаллизации жидкого ядра точки (после выключения тока), давление на электроды увеличивают, проводя проковку сварочной точки. Для повышения качества шва свариваемые поверхности желательнее зачистить и обезжирить.

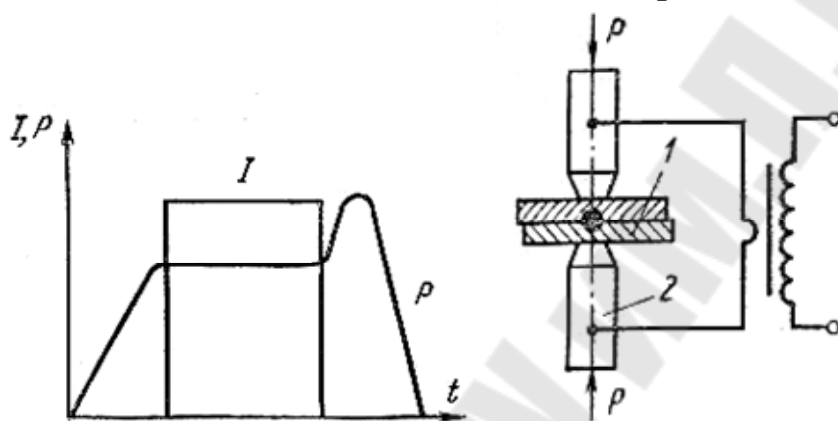


Рис. 5.23. Циклограмма и схема контактной точечной сварки

**В зависимости от расположения электродов по отношению к свариваемым заготовкам** точечная сварка может быть односторонней и двусторонней. При *двусторонней сварке* две или более заготовки сжимаются между электродами точечной машины. При *односторонней сварке* ток распределяется между верхним 3 и нижним 4 листами, зажатыми между электродами точечной сварочной машины, причем нагрев сварочной зоны происходит за счет части тока, проходящей через нижний лист 5 (рис. 5.24). Для его увеличения основание изготавливают из меди. Получается одновременно две точки. В машиностроении используют многоточечные сварочные автоматы (до 100 пар электродов), например, при сварке кузовов автомобилей, вагонов, панелей и др. **Основные параметры сварки:** сила сжатия, плотность тока, время протекания тока. Длительность прохождения тока обычно составляет 0,1...1,5 с.

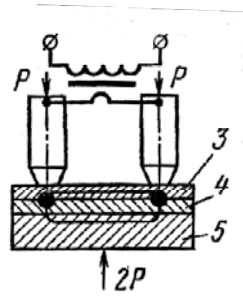


Рис. 5.24. Схемы контактной точечной сварки с односторонним расположением электродов

Точечную сварку в основном используют для штампованных изделий из низко – и среднеуглеродистых сталей, низко – и высоколегированных сталей, алюминиевых сплавов. Сварка заготовок из чистой меди, по причине применения медных электродов и, как следствие, возможного их приваривания к заготовкам, не производится. Точечная сварка ведется на мягком режиме при плотности тока  $80 \dots 100 \text{ А/мм}^2$  и жестком режиме при плотности тока  $200 \dots 600 \text{ А/мм}^2$ .

*Жесткий режим* применяют для сварки тонких листов толщиной до 3 мм из материалов с высокой теплопроводностью (алюминий, медь). При жестком режиме заготовки быстро разогреваются, быстро свариваются и охлаждаются за счет интенсивного отвода теплоты в неразогретый металл, окружающий сварную точку. Метод обеспечивает высокую производительность. Он не применяется при соединении заготовок из закаливаемых сталей и заготовок толщиной свыше 4 мм. В первом случае быстрое охлаждение сварочной точки может привести к её закалке и охрупчиванию. Во втором при сварке заготовок толщиной 3...7 мм собственное сопротивление заготовок ( $R_{\text{заг}}$ ) увеличивается до значений близких к сопротивлению сварочного контакта  $R_{\text{к}}$ . В итоге область выделения «джоулевой» теплоты увеличивается, что требует более длительного прогрева сварочного контакта, который возможен только при реализации сварки на мягком режиме.

При *мягком режиме* сварки разогреваются большие объемы металла, окружающие сварную точку, и обеспечивается более медленное охлаждение сварной точки. При соединении стальных листов толщиной более 3 мм активное сопротивление заготовок может оказаться выше сопротивления контакта. Медленное охлаждение сварной точки исключает закалку металла и его охрупчивание. Этот режим менее производителен.

К недостаткам точечной сварки можно отнести следующие: сварка может производиться только внахлест, ограничена толщина свариваемых заготовок, невысокая прочность соединений при знакопеременных циклических нагрузках, не герметичный сварной шов.

Достоинствами данного вида сварки являются высокая производительность, возможность полной автоматизации процесса, отсутствие требований к повышенной квалификации исполнителя.

### Шовная контактная сварка

Шовную сварку выполняют непрерывным швом вращающимися дисковыми электродами. При шовной сварке листовые заготовки 1 также собирают внахлестку, зажимают между электродами 2, пропускают ток и прокатывают их между ними. При движении роликов по заготовкам образуются перекрывающиеся друг друга сварные точки, образуя сплошной герметичный шов. Как и точечная шовная сварка может производиться при двустороннем и одностороннем расположении электродов (рис. 5.25) при непрерывной и прерывистой подаче тока (рис. 5.26).

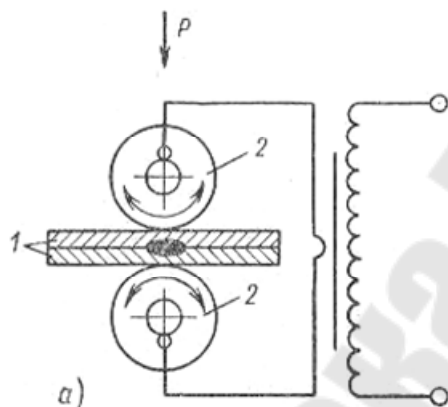


Рис. 5.25. Схема контактной шовной сварки

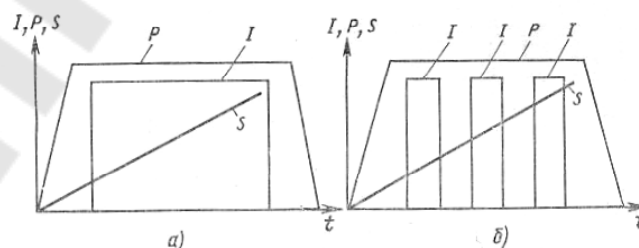


Рис. 5.26. Циклограммы непрерывной (а) и прерывистой подачи тока (б)

Непрерывный режим используется при сварке коротких швов металлов не склонных к перегреву. Режим с прерывистым включением тока обеспечивает высокое качество сварного шва при малых зонах термического влияния и применяется для сварки высоколегированных сталей, алюминиевых и медных сплавов.

Шовная сварка обеспечивает высокую производительность – до 10 м/мин при соединении листового материала толщиной от 0,3 до 3 мм. Применяется она при изготовлении емкостей (баллонов, цистерн, баков и др.), соединении листовых заготовок.

### **Высокочастотная сварка**

*При высокочастотной сварке нагрев соединяемых участков до пластического состояния осуществляется электрическим током высокой частоты с последующим сжатием для образования сварного соединения.* Этот метод применяется для продольной сварки трубных заготовок и других тонкостенных изделий. В местах контакта стыкуемых кромок стальных заготовок температура достигает 1200...1300°C. Вследствие высокой интенсивности нагрева скорость сварки может достигать десятков и даже сотен метров в минуту, что выше чем при контактной, шовной или дуговой сварке, при этом обеспечивается очень малая зона термического влияния (0,15...20 мм). Высокочастотной сваркой могут свариваться различные стали, медные и алюминиевые сплавы, разнородные материалы толщиной от 0,8 до 14 мм. Энергетически она в 3...4 раза менее энергоемка чем контактная шовная.

#### **5.4.2. Конденсаторная сварка**

*Конденсаторная сварка* представляет собой один из видов сварки запасенной энергией. Энергия накапливается в конденсаторах при их зарядке от источника постоянного тока, а затем в процессе разряда преобразуется в теплоту, используемую для сварки. Эта теплота выделяется в контакте между соединяемыми заготовками при протекании через них тока. Накопленную энергию  $A$  можно регулировать изменением емкости  $C$  и напряжения зарядки:  $A = CU^2/2$ . Преимущества этого вида сварки: точная дозировка энергии, малое время протекания тока (0,001...0,0001с) при высокой плотности тока, возможность сварки материалов очень малых толщин от долей микрометра до 1 мм. Применяют ее в приборостроении и радиоэлектронике (рис. 5.27).

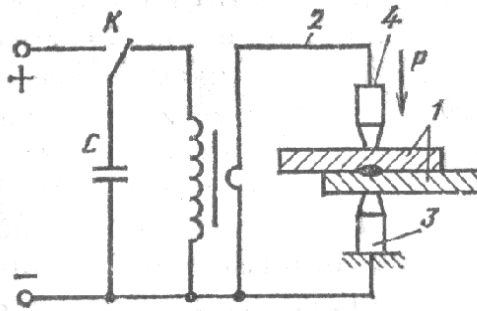


Рис. 5.27. Схема конденсаторной сварки

### 5.4.3. Специальные виды сварки

**Холодная сварка** осуществляется за счет значительной пластической деформации в зоне контакта 2 соединяемых материалов 1 без внешнего нагрева. Большое усилие сжатия обеспечивает разрушение пленки оксидов на свариваемых поверхностях, образование чистых поверхностей металлов и прочных металлических связей. Поверхности 2 перед сваркой зачищают и обезжиривают. Холодной сваркой выполняют точечные, шовные и стыковые соединения (рис.5.28). При точечной сварке каждый пуансон 5 внедряется на глубину 70...80% толщины свариваемых деталей. Свариваемость определяется пластичностью металлов. Хорошо свариваются Al, Cu, Ni, Ag, Au. Высокопрочные металлы и сплавы не свариваются этим видом. Соединяют металлы толщиной 0,2...15 мм. Давление в месте контакта достигает величины 150...1000 МПа.

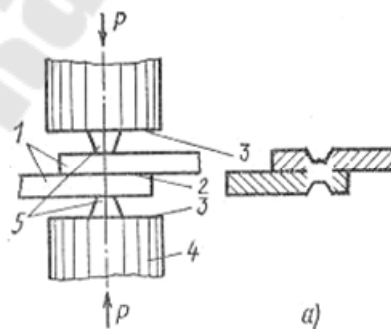


Рис.5.28. Схема холодной сварки

Достоинства сварки давлением: низкая энергоемкость, высокая производительность, отсутствие расходных материалов, возможность автоматизации. К недостаткам можно отнести: ограниченность свариваемых материалов их пластичностью (более 30 %), снижение несущей способности.

щей способности сварных соединений из-за глубоких вмятин на поверхности.

**Сварка трением** осуществляется в результате совместной пластической деформации заготовок, поверхности которых предварительно нагреты трением при их относительном перемещении. При трении механическая энергия непосредственно в зоне трения переходит в тепловую. При достижении необходимой температуры относительное перемещение прекращается и увеличивается осевое давление, в результате которого происходит пластическая деформация с образованием металлических связей между поверхностными атомами. Сварка осуществляется в твердой фазе без расплавления металла. Трение поверхностей осуществляется вращением, реже возвратно-поступательным перемещением сжатых заготовок (рис. 5.29).

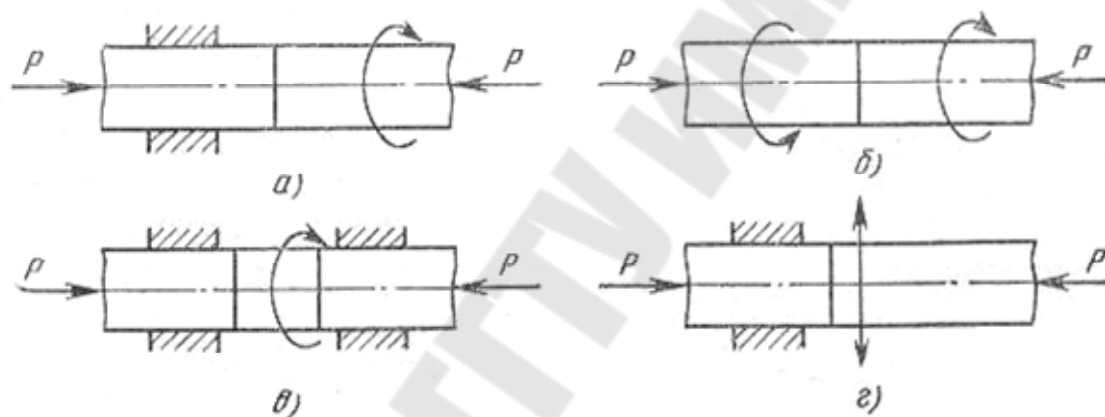


Рис. 5.29. Схемы сварки трением:

а – при вращении одной из свариваемых заготовок; б – при вращении обеих свариваемых заготовок; в – при вращении третьей свариваемой вставки; г - при возвратно – поступательном перемещении свариваемых деталей

Основными параметрами процесса являются: скорость относительного перемещения, продолжительность трения, сила сжатия, величина пластической деформации (осадки). Технологические параметры зависят от природы свариваемых металлов, площади поперечного сечения свариваемых заготовок, конфигурации деталей. Для обеспечения качественного соединения в конце процесса необходимо быстрое прекращение движения и применение осадочного осевого давления.

Данный вид сварки обеспечивает высокую прочность соединения, позволяет соединять разнородные металлы и сплавы, характеризуется высокой производительностью. В инструментальном производстве ее используют при изготовлении сверл, метчиков, фрез, где режущую часть из быстрорежущей стали приваривают к хвостовику из стали 45. В машиностроении трением сваривают штоки, клапаны ДВС, ступенчатые оси и валы и др.

**Ультразвуковая сварка** является разновидностью сварки давлением с использованием взаимного микросмещения свариваемых поверхностей. Сварка осуществляется при воздействии на заготовки, сжатые при сравнительно небольшом давлении, механических колебаний с частотой более 16 кГц (рис. 5.30).

Свариваемые заготовки 5 размещаются на опоре 6. Рабочий инструмент 3 подсоединяют к магнитострикционному преобразователю 1 через трансформатор (концентратор) продольных упругих колебаний 2, упругие деформации от которого передаются на наконечник рабочего инструмента, находящегося под нагрузкой  $P$ . Магнитострикционный преобразователь подключают к высокочастотному генератору 2. В результате микросмещений инструмента в пределах 20...40 мкм с высокой частотой происходит разрушение пленок, нагрев поверхностных слоев материала и образование сварного соединения. Сравнительно небольшое тепловое воздействие на свариваемые материалы обуславливает незначительные изменения их структуры и физико-механических свойств. Применяют этот вид сварки для соединения тонких листов толщиной от 0,001 до 1 мм. Рабочее усилие составляет 0,1...2,5 кН. Можно сваривать точечной, шовной сваркой и по контуру тонкие и ультратонкие детали, разнородные металлы, металлы с керамикой.

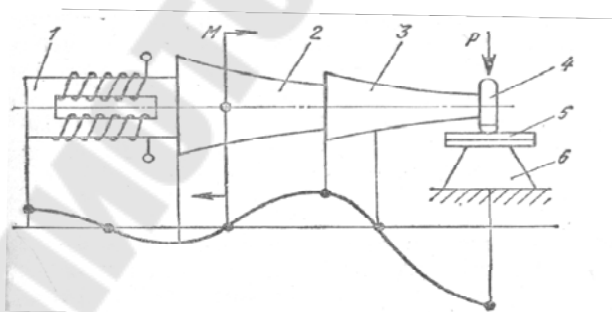


Рис. 5.30. Схема ультразвуковой сварки

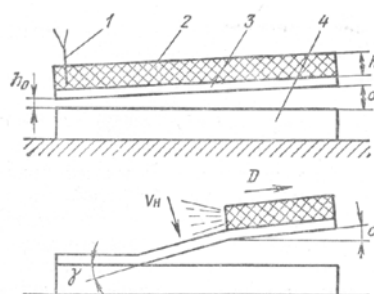


Рис. 5.31. Схема сварки взрывом

**Сварка взрывом** осуществляется за счет совместной пластической деформации поверхностных слоев двух заготовок при их соударении в результате направленного взрыва. Свариваемые пластины 3 и 4 располагаются на расстоянии  $h_0$  под углом  $\alpha$  друг к другу. Одна из пластин 4 неподвижна, расположена на основании (рис. 5.31). На подвижной пластине укладывается взрывчатое вещество 2 толщиной  $H$  и со стороны, находящейся в вершине угла, устанавливается детонатор 1. При соударении пластин, движущихся с большой скоростью, между ними образуется кумулятивная струя, разрушающая и уносящая поверхностную оксидную пленку и загрязнения. Поверхности сближаются на расстояния действия межатомных сил взаимодействия. Происходит схватывание материалов по всей площади контакта. Длительность процесса составляет несколько микросекунд. Метод используется при изготовлении биметаллических деталей.

**Диффузионная сварка** выполняется в вакууме. Соединение деталей происходит за счет взаимной диффузии атомов в поверхностных слоях, контактирующих под давлением нагретых материалов. Температура нагрева составляет  $(0,5...0,7) T_{пл}$  более легкоплавкого материала. Рабочее давление составляет от 5 до 20 МПа. Этим способом можно соединять разнородные металлы, керамику. Применяется диффузионная сварка в основном в приборостроении.

## 5.5. Особенности сварки различных материалов

Прочность и надежность сварных конструкций определяется правильным выбором свариваемых и сварочных материалов, способов и условий сварки.

### Сварка конструкционных сталей

К конструкционным сталям относятся углеродистые и легированные стали, содержащие до 5 % легирующих элементов. Исходя из химического состава *конструкционные стали по степени свариваемости* подразделяются на 4 группы.

Первая группа – **хорошо сваривающиеся стали**. К ним относятся низкоуглеродистые стали, содержащие до 0,25 % углерода, а также низколегированные с содержанием углерода до 0,2 %. К этой группе относятся стали обыкновенного качества Ст1, Ст2, Ст3, качественные конструкционные стали 08, 10, 15, 20, 25, 15Х, 20Х, 09Г2 и



др. Стали свариваются большинством способов без особых проблем. Стали свариваются без трещин при температуре окружающей среды до  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Отсутствует необходимость в последующем отжиге сварных соединений для снятия напряжений.

Вторая группа – *удовлетворительно сваривающиеся стали*. К ним относятся стали с содержанием углерода или его эквивалента в пределах  $0,25\dots 0,35\%$ , например, стали 30, 35, 20ХНА, 20ХГС и др. Конструкции свариваются при температурах окружающей среды выше  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При более низких температурах и при толщине свариваемых деталей более 25 мм необходим подогрев деталей перед сваркой до температуры  $50\dots 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После сварки желательна термообработка, особенно толстостенных деталей.

Третья группа включает *ограниченно сваривающиеся стали*. В нее входят стали с содержанием углерода или его эквивалента  $0,35\dots 0,45\%$ , например, стали 40, 45, 30ХН, 30ХГСА, 25Х2Н4А и др. Для них необходим подогрев деталей перед сваркой до  $100\dots 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  и отжиг после сварки.

К четвертой группе относятся *плохо сваривающиеся стали*. Сюда входят стали с содержанием углерода или его эквивалента  $0,5\%$  и более. При сварке необходим для них предварительный подогрев до  $250\dots 350\text{ }^{\circ}\text{C}$  и термообработка после сварки. К этой группе относятся стали 45Г, 40Х, 40ХН, 60СГА, 38Х2МЮА, У7 и др. Контактную точечную сварку этих сталей производят на мягких режимах. Контактную стыковую сварку выполняют с прерывистым оплавлением с подогревом заготовок перед сваркой и замедленным охлаждением.

### **Сварка коррозионно-стойких сталей**

Стали, содержащие хрома около  $13\%$ , относятся к мартенситному и мартенситно-перлитному классу, например, 08Х13, 12Х13, 20Х13 и др. Они обладают низкой теплопроводностью и склонны к короблению. Сварку их следует вести на мягких тепловых режимах, т.е. с малой плотностью тока, т.к. в зоне сварки при обычных условиях охлаждения происходит закалка. Для улучшения свариваемости при толщинах деталей более 8 мм применяют местный подогрев до  $200\dots 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После сварки шов имеет повышенную твердость, поэтому необходимо производить отжиг при температуре  $700\dots 760\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Жаростойкие, жаропрочные и коррозионно-стойкие стали, содержащие 18 и более процентов хрома и 8 и более процентов никеля,

относятся к аустенитному классу. Они имеют высокую пластичность, а, соответственно, низкую склонность к образованию холодных трещин. Однако при длительном нахождении при температурах 500...800 °С происходит потеря коррозионной стойкости шва, вследствие образования по границам зерен карбидов хрома и обеднения хромом приграничных участков зерен. Появляется склонность к межкристаллитной коррозии. Для предотвращения этого недостатка рекомендуется сварку вести при малой плотности тока с применением теплоотводящих медных подкладок для уменьшения времени пребывания металла при высоких температурах. Для предупреждения возникновения горячих трещин в сварных швах целесообразно вводить в сварочные электроды Si, Al, Mo, Mn и др. элементы, способствующие измельчению зерна.

### **Сварка чугуна**

Чугун относится к категории плохо свариваемых сплавов. Сварка применяется лишь для исправления дефектов в отливках и при ремонте деталей. Дуговую сварку осуществляют без подогрева стальными, медно-железными, медно-никелевыми и электродами из никелевого аустенитного чугуна. Наибольшее применение получили медно-железные электроды как более дешевые и обеспечивающие достаточную прочность шва. Однако качество шва при холодной сварке все же невысокое, зона сварки зачастую имеет множество трещин. Более высокое качество обеспечивает горячая сварка, при которой зона сварки подогревается до 400...700 °С (зачастую в печи). Сварка производится чугунными электродами со специальными покрытиями. Зона сварки защищается графитом. Затем опять сварное соединение помещается в печь и охлаждается вместе с печью. При этом удается избежать отбеливания чугуна и его закалки. Однако этот процесс дорогой и применяется для ответственных отливок.

### **Сварка меди и ее сплавов**

Латуни и бронзы допускают сварку плавлением, но, находящиеся в них вредные примеси ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $Bi$ ) ухудшают их свариваемость. К снижению прочности шва приводят оксиды меди  $Cu_2O$ . Кроме того, оксиды приводят к возникновению горячих трещин, вследствие обра-

зования эвтектики  $\text{Cu}_2\text{O} - \text{Cu}$ . Наличие эвтектики по границам зерен охрупчивает шов при нормальных температурах.

Вследствие высокой теплопроводности медь сваривают при повышенной плотности тока, а при толщине деталей более 10 мм – с подогревом до 300 °С. Детали сечением более 30 мм сваривают плазменной сваркой. В ремонтных целях применяют газовую сварку с использованием флюсов на основе буры ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), наносимых на сварочные кромки и присадочный пруток.

Основной проблемой при сварке латуней является испарение цинка, что приводит к снижению прочности и коррозионной стойкости шва. Кроме того пары цинка ядовиты, что требует интенсивной вентиляции и использования сварщиком специальных масок. Сварку в защитных газах осуществляют в основном неплавящимся вольфрамовым электродом. При газовой сварке используют газовый флюс (смесь метилбората и метилового спирта). При сварке деталей толщиной более 12 мм необходим предварительный подогрев до температуры 150 °С.

Для сварки бронзы используют те же способы, что и при сварке латуней, за исключением оловянистых бронз. Их сваривают с большей скоростью и без подогрева. Латуни и бронзы хорошо свариваются контактной сваркой.

### **Сварка алюминиевых сплавов**

Трудности при сварке алюминиевых сплавов обусловлены образованием тонкой прочной и тугоплавкой поверхностной пленки из оксидов  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , которая препятствует сплавлению с основным металлом. Температура плавления оксидной пленки 2500 °С. Ее удаление достигается растворением в пастообразных флюсах, наносимых на поверхность перед сваркой. Сварку проводят на переменном токе плавящимся электродом. Если применять постоянный ток обратной полярности и варить неплавящимся электродом в среде  $\text{Ar}$ , то удаление пленки осуществляется бомбардировкой анионов аргона.

Алюминиевые сплавы склонны к образованию газовой пористости и горячих трещин. Для предупреждения газовой пористости по водороду, поверхность деталей перед сваркой травят в  $\text{NaOH}$ , удаляя вместе с остатками пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и всю влагу, которая находится на свариваемых поверхностях. Для предупреждения образования горячих трещин при наличии более 0,5 %  $\text{Si}$  в алюминиевом сплаве, шов

варят присадочной проволокой модифицированной Fe, Zr, Ti, В. Эти элементы измельчают зерно алюминия в шве и не позволяют кремнию создавать оплавленные силуминовые микрзоны.

Дуговая сварка алюминиевых сплавов возможна лишь при хорошей изоляции зоны сварки от кислорода с помощью специальных флюсов или инертных газов.

Наилучшие качества шва достигаются при аргонодуговой сварке. Детали толщиной до 10 мм сваривают неплавящимся электродом, а свыше - плавящимся. Применяется также автоматическая сварка полуоткрытой дугой под слоем флюса, при которой для формирования корня шва используют медную или стальную подкладки. Алюминиевые сплавы также свариваются плазменной и электро-шлаковой сваркой. Благодаря высокой тепло – и электропроводности алюминиевые сплавы хорошо свариваются контактной сваркой при повышенной силе тока.

### **Сварка титановых сплавов**

Титановые сплавы при нагреве интенсивно поглощают газы – кислород, водород, и азот, что приводит к снижению их пластичности. Поэтому сварку этих сплавов проводят в защитной атмосфере аргона высшего сорта. Перед сваркой сварочную проволоку и основной металл дегазируют путем отжига в вакууме. Для сварки титановых сплавов применяют также плазменную и электронно-лучевую сварку.

### **Технологичность сварных соединений**

Под технологичностью понимается выбор такого конструктивного оформления заготовки, которое обеспечивает удобство и простоту изготовления изделия при минимальных затратах материалов, низкой себестоимости, высокой производительности, возможности механизации и автоматизации большинства операций, сведении к минимуму искажений формы при сварке.

### **Выбор типа сварного соединения**

Тип сварного соединения характеризуется взаимным расположением свариваемых элементов (рис. 5.9 и 5.10). Выбирается он ис-

ходя из обеспечения равной прочности соединения с основным металлом и технологичности процесса сварки.

**Стыковые соединения** обеспечивают высокую прочность при статических и динамических нагрузках и выполняются практически всеми видами сварки плавлением и некоторыми видами сварки давлением. Форма разделки кромок осуществляется в зависимости от толщины свариваемых элементов, из условий проплавления и обеспечения формирования качественного корня шва. При сварке элементов различной толщины кромку более толстого элемента выполняют со скосом.

**Тавровые соединения** применяют при изготовлении пространственных конструкций. Выполняют их с одно – и двусторонней разделкой шва любым способом сварки плавлением. Они обеспечивают высокую прочность соединения при любых нагрузках.

**Нахлесточные соединения** используют при сварке листовых заготовок. Они просты в подготовке и сборке под сварку. Однако прочность этих соединений ниже, чем при стыковой сварке и они менее экономичны, что связано с увеличением расхода основного металла, обусловленного наличием перекрытия свариваемых элементов. Нахлесточное соединение весьма технологично при сварке давлением, особенно при контактной точечной и шовной сварке, обеспечивает одно – и двусторонний подвод электродов перпендикулярно свариваемым поверхностям.

**Угловые соединения** выполняют в основном в качестве связующих для передачи рабочих усилий и выполняются всеми видами сварки плавлением.

### **Выбор способа уменьшения сварочных напряжений**

Поперечную и продольную усадку свариваемых заготовок можно скомпенсировать путем увеличения размеров заготовок на величину предполагаемых деформаций. Угловое перемещение может быть исключено закреплением заготовок или угловым изгибом заготовок перед сваркой, заменой V-образной разделки на U-образную, а при больших толщинах – на X-образную, симметрично центру тяжести сечения шва, применением ребер жесткости.

Для снятия остаточных сварочных напряжений применяют высокий отпуск сварных заготовок, а также прокатку или проковку сварных швов.

## 5.6. Нанесение износостойких и жаростойких покрытий

### 5.6.1. Наплавка

*Наплавка* – процесс, при котором на поверхность наносят слой металла требуемого состава. Применяют наплавку при ремонте изношенных деталей и для упрочнения поверхностей. Существует множество технологических процессов наплавки, некоторые из которых рассмотрены ниже.

*Ручная дуговая наплавка* проста в аппаратном обеспечении, производится короткой дугой при малой плотности тока.

*Наплавка автоматической дугой под флюсом* обеспечивает большой объем жидкой ванны металла и флюса, позволяет применение многоэлектродных лент, обеспечивает высокую производительность, малую глубину проплавления основного металла.

*Электрошлаковая наплавка* позволяет наплавлять слои толщиной более 20 мм, обеспечивая высокую производительность.

*При наплавках токами высокой частоты* на поверхность предварительно наносится присадочный материал, а затем деталь помещают в индуктор.

*Дуговая наплавка неплавящимся электродом* применяется для нанесения тонких слоев твердых сплавов.

*Плазменно-дуговая, газопламенная, лазерная наплавки* позволяют обеспечить нанесение покрытий с локальным тепловым воздействием, минимальным перемешиванием наплавочного и основного металлов при практическом отсутствии деформаций изделия после наплавки.

### Наплавочные материалы

Для ручной дуговой наплавки используют электроды соответствующего состава диаметром 3,2...8 мм с фтористо-кальциевым, высококорунтовым и карбонато-рутиловым покрытием.

Для автоматической дуговой наплавки под флюсом применяют стальную проволоку диаметром 0,8...6,4 мм, в которую вводят в качестве раскислителей Si, Mn, Al, Ti и дополнительно легирующие элементы V, Cr, Ni, Mo и др.

При наплавке применяют ленточные электроды соответствующего состава толщиной 0,4 мм и шириной 25...75 мм. При наплавке

под флюсом ширина электродов доходит до 150 мм. Для износостойких наплавов твердых сплавов применяют специальные порошковые ленты, состоящие из стальной основы с полостями, которые заполнены легирующей шихтой и шлакообразующими компонентами (рис.5.34). Применяют для наплавки также порошковую проволоку, представляющую собой полую металлическую оболочку, заполненную флюсующими и металлическими порошками. В качестве флюсов используют те же материалы как и при сварке.

*Наплавочные материалы по назначению* можно подразделить на:

- высоколегированные сплавы на основе хрома и вольфрама (для повышения износостойкости);
- твердые карбидные сплавы (для повышения износостойкости);
- сплавы на основе никеля и кобальта (для повышения жаростойкости, стойкости против коррозии);
- сплавы на основе меди;
- баббиты (для улучшения антифрикционных свойств);
- сплавы оловянные (для повышения стойкости против коррозии).

Наплавленные изделия подвергаются отпуску для снятия внутренних напряжений при температуре около 600 °С для низкоуглеродистых и низколегированных сталей, при 680 °С для среднелегированных и при 735...760 °С для высоколегированных сталей.

*Преимущества наплавки:*

- возможность нанесения покрытий большой толщины;
- высокая производительность до 15..25 кг/ч;
- простота конструкции оборудования;
- отсутствие ограничений по размерам;
- простота технологии;
- возможность нанесения покрытий на металлы любого состава.

*Недостатки наплавки:*

1. Возможность деформации детали из-за высокой погонной энергии. Наплавку желательно вести в зажатом состоянии или создавать предварительную деформацию противоположного знака.
2. Трудности наплавки на мелкие детали.
3. Необходимость учета сочетания материалов основы и наплавки. При образовании интерметаллидных соединений на границе появляется хрупкость.

## 5.6.2. Напыление

**Напылением** называется нанесение покрытий с помощью высокотемпературной скоростной струи, содержащей частицы расплавленного материала, осаждаемые на поверхность при ударном столкновении. В зависимости от источника тепловой энергии различают: газопламенное, дуговое, электроимпульсное, плазменное и детонационное напыление.

При **газопламенном нанесении покрытия** расплавление напыляемого металла осуществляется от теплоты, выделяемой при сгорании газа, а доставка капель расплава воздушной струей.

При **дуговой металлизации** используют специальные металлизаторы, в конструкции которых через два направляющих мундштука 2, подключенных к источнику электрического тока, подается наплавочная проволока 4. При соприкосновении проволоки на выходе происходит короткое замыкание, возникает дуговой разряд 1 и образование капель металла, которые увлекаются струей сжатого воздуха, поступающего в корпус 3 через рукоятку 5, и направляются к металлируемой поверхности (рис. 5.32). Метод обеспечивает высокую производительность до 36 кг/ч. Используется проволока диаметром 1,5...3,2 мм, величина тока до 500...700 А. Однако происходит перегрев металла и его окисление, а также выгорание некоторых легирующих элементов.

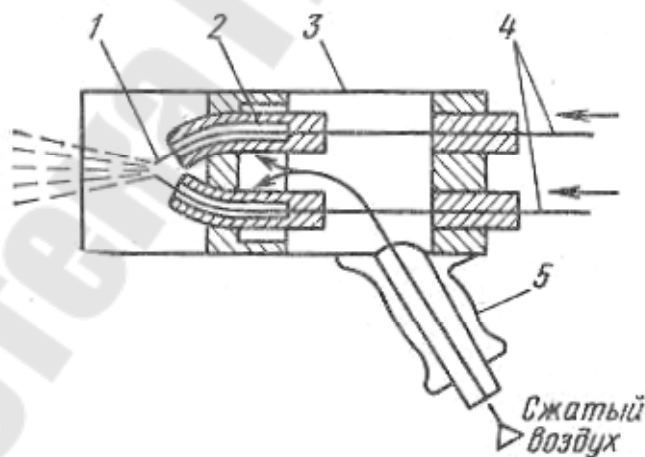


Рис. 5.32. Схема дугового металлизатора

**Плазменное напыление** в зависимости от вида напыляемого материала производится плазменной струей (порошок) или плазменной дугой (проволока). Метод обеспечивает высокую производительность, высокую плотность покрытия, хорошую сцепляемость его с



поверхностью, широкий спектр материалов, возможность осуществления технологических процессов как в атмосфере, так и в защитных газах. Недостатком способа является относительно низкая производительность, а также высокий уровень шума и ультрафиолетового излучения.

*При электроимпульсном режиме* для расплавления используется энергия разряда конденсатора через проволоку наплавляемого металла (рис. 5.33). Используется проволока диаметром 0,5...1 мм, длиной 20...50 мм. Емкость конденсатора ~ 100 мкф, напряжение ~ 30 кВ. Этот метод обеспечивает высокую производительность (сотни метров в секунду), исключает окисление поверхности. Однако можно создавать покрытия небольшой толщины из электропроводных материалов.

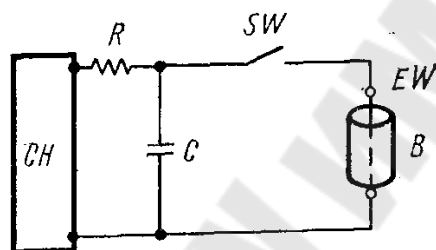


Рис. 5.33. Схема электроимпульсного напыления: СН – источник питания для зарядки конденсатора, R - резистор, С - конденсатор, SW – выключатель, EW – металлическая проволока, В – основной материал (цилиндрическое изделие)

Напылением можно наносить покрытия на любые поверхности, различных материалов на одном и том же оборудовании. Для большинства методов отсутствуют ограничения по размерам и геометрии поверхностей. Возможно нанесение покрытий различной толщины, в том числе и многослойных, из различных материалов при значительных деформациях. Технология отличается небольшой трудоемкостью и высокой производительностью.

К недостаткам можно отнести невысокую эффективность при нанесении покрытий на мелкие детали, оператору необходимо работать во вредных условиях при подготовке поверхностей под покрытия (пескоструйная и дробеструйная обработки, обезжиривание), а также необходимость обеспечения хорошей вентиляции при напылении.

По сравнению с наплавленным металлом напыленный слой имеет меньшую прочность и плотность, т.к. состоит из мелких поверхностно-окисленных частиц.

Напыление применяют для защиты от коррозии, изнашивания цистерн, бензобаков, мостов, изнашивающихся частей валов, деталей машин и др., а также с декоративной целью.

## 5.7. Пайка металлов и сплавов

*Пайкой* называют процесс получения неразъемного соединения заготовок без их расплавления путем смачивания сопрягаемых поверхностей жидким припоем с последующей его кристаллизацией.

Для обеспечения растекания припоя по поверхности заготовок и хорошего смачивания заготовки нагревают, а также обрабатывают флюсами, которые растворяют и удаляют с поверхности оксиды, уменьшают поверхностное натяжение.

Пайка экономичнее сварки, не вызывает существенных изменений химического состава и механических свойств деталей, позволяет соединять разнородные металлы и сплавы. Остаточные деформации при пайке меньше, чем при сварке.

*В качестве припоев* используют сплавы цветных металлов сложного состава. По температуре плавления припои подразделяют на: *особо легкоплавкие*  $T_{пл} < 145\text{ }^{\circ}\text{C}$ , *легкоплавкие*  $T_{пл} = 145\dots 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , *среднеплавкие*  $T_{пл} = 450\dots 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ , *тугоплавкие*  $T_{пл} > 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Особо легкоплавкие и легкоплавкие припои изготавливают на основе висмута, кадмия, цинка, олова, свинца.

Среднеплавкие и тугоплавкие содержат медь, никель, цинк, а также серебро, золото, платину.

Паять можно стали всех марок, цветные металлы и чугуны. Необходимо лишь правильно выбрать припой и флюс. Флюс не должен химически взаимодействовать с припоем, температура плавления его должна быть ниже температуры плавления припоя. Применяют твердые, пастообразные и жидкие флюсы. *В качестве флюсов применяют* буру  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , борную кислоту  $\text{H}_2\text{BO}_3$ ,  $\text{ZnCl}_2$ , KF.

*При пайке в печах* заранее собирают узел, закладывают в него припой, наносят флюс, а затем помещают в печь. Припой расплавляясь заполняет зазоры между соединяемыми заготовками.

При *индукционной* пайке паяемый участок нагревают в индукторе. Через индуктор пропускают ТВЧ, в результате чего место пайки

нагревается до необходимой температуры. Для предохранения от окисления изделие нагревают в вакууме или в защитной среде с применением флюсов. Индуктор выполняют в виде петли или спирали из красной меди. Формы и размеры индуктора зависят от конструкции паяемого изделия.

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. На паяемую поверхность, предварительно очищенную от грязи и жира, наносят флюс, между кромками или около места соединения размещают припой, затем детали скрепляют и погружают в ванну. Соляная ванная предохраняет место пайки от окисления. Перед погружением в ванну с расплавленным припоем покрытые флюсом детали нагревают до температуры 550 °С. Поверхности, не подлежащие пайке, предохраняют от контакта с припоем специальной обмазкой из графита с добавками небольшого количества извести. Пайку погружением в расплавленный припой используют для стальных, медных и алюминиевых сплавов, деталей сложных геометрических форм. На этот процесс расходуется большое количество припоя.

При *газопламенной* пайке заготовки нагревают и припой расплавляют газосварочными, плазменными горелками или паяльными лампами. При пайке газосварочными горелками в качестве горючих газов используют ацетилен, природные газы, водород, пары керосина и т.п. При использовании газового пламени припой можно заранее помещать у места пайки или вводить в процессе пайки вручную. На место пайки предварительно наносят флюс в виде жидкой пасты, разведенной водой или спиртом; конец прутка припоя также покрывают флюсом.

*Плазменной горелкой*, обеспечивающей более высокую температуру нагрева, паяют тугоплавкие металлы – вольфрам, тантал, молибден, ниобий и т.п.

При пайке *паяльником* основной металл нагревают и припой расплавляют за счет теплоты, аккумулированной в массе металла паяльника, который перед пайкой или в процессе ее подогревают. Для низкотемпературной пайки применяют паяльники с периодическим нагревом, с непрерывным нагревом и ультразвуковые. Рабочую часть паяльника выполняют из красной меди. Паяльник с периодическим нагревом в процессе работы периодически подогревают от постороннего источника теплоты. Паяльники с периодическим и непрерывным

нагревом чаще используют для флюсовой пайки черных и цветных металлов легкоплавкими припоями с температурой плавления ниже 300 – 350<sup>0</sup>С.

**По условиям заполнения зазора и механизму образования соединения** пайку подразделяют на:

- *капиллярную*, в которой затекание и удержание в зазоре припоя основано на капиллярном эффекте;
- *контактно-реактивную*, в которой в контакте металл – металл или металл – припой образуются соединения с низкой температурой плавления, выполняющие роль припоя;
- *реактивно-флюсовую*, где припой образуется в результате взаимодействия металла и флюса;
- *диффузионную* – процесс, при котором паянный шов затвердевает из состояния выше температуры солидуса.

Преимущества пайки перед сваркой:

- возможность соединять плохо свариваемые и разнородные материалы;
- за один прием возможно соединение нескольких деталей;
- кромки деталей не оплавляются и возможно сохранить размеры и форму деталей;
- возможен демонтаж соединения.

### **Подготовка деталей к пайке**

Необходима тщательная механическая очистка поверхностей под пайку, а также желательна химическая, электрохимическая и обезжиривание.

При пайке некоторых металлов желательно предварительное покрытие поверхностей припоем или металлом хорошо паяемым (высоколегированные стали, алюминий, алюминиевые бронзы). В качестве покрытий используют олово, медь, никель, серебро, оловянно-свинцовый припой и др. Способы покрытия: окунание и гальванопокрытие, перспективно покрытие в тлеющем разряде.

Сборка узла должна обеспечивать надежную фиксацию деталей с требуемым зазором и поступление припоя в зазор. Применяют обычно специальные приспособления.

## Выбор припоев и флюсов для пайки

Широко используются низкотемпературные припои на основе Pb – Sn с  $T_{\text{пл}} \sim 180 \text{ }^\circ\text{C}$  (ПОС-61, содержащий 61 % олова) с пределом прочности на разрыв 45 МПа, относительным удлинением при разрыве 35...50 % и пределом прочности на срез 22...32 МПа. Кроме того используют оловянисто-свинцовистые припои, содержащие добавки Sb, Ag, Cu (ВПр6, ВПр9 и др).

Для пайки паяльником латуни и меди используют припои на основе свинца с 1,5–3 % серебра. Для изделий из алюминиевых и цинковых сплавов применяют припои на основе олова и цинка. Для пайки полупроводниковых материалов, криогенной техники, вакуумных соединений используют индиевые припои, содержащие 42–97 % индия ( $T_{\text{пл}} = 72\text{--}56 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Они имеют высокую коррозионную стойкость и пластичность.

Высокотемпературные припои – латуни и медные сплавы, применяют для плавки высоколегированных сталей, никеля и его сплавов. Можно нанести слой 5-15 мкм гальваническим путем на детали и затем производить пайку. Недостаток этих припоев – высокая температура плавления.

Латунями паяют с нагревом ТВЧ, в печах, пламенем газовой горелки или в соляных ваннах с применением флюсов (буры и различных смесей).

В вакууме и защитных средах латунями не паяют, т.к. происходит выгорание цинка. Для пайки применяют как простые латуни, так и легированные оловом и кремнием, например, ЛОК 62-06-04, ЛОК 59-1-03 с  $T_{\text{пл}} = 825\text{...}980 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_{\text{в}} = 210\text{...}340 \text{ МПа}$ . Кремний является в них раскисляющим элементом.

Для нержавеющей сталей медно-цинковые припои не применяются, т.к. они склонны к образованию трещин. Применяют Cu-Ni, Cu-Ni-Mn, например, ВПр1, ВПр2, ВПр4 и др. ( $\sigma_{\text{в}} = 200\text{...}240 \text{ МПа}$ ,  $T_{\text{пл}} = 900\text{...}1280 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Пайка осуществляется в вакууме или в среде инертных газов.

В электротехнике для пайки меди применяют сплав меди с 4...9 % Р и др. элементами, самофлюсующимися припоями с  $T_{\text{пл}} \sim 850 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Изделия, испытывающие вибрационные и повышенные статические нагрузки, паяют серебряными припоями (15...71% Ag, осталь-

ное Cu и добавки), например, ПСР72 с  $T_{пл} = 779$  °С. Предел прочности при срезе соединения выше предела текучести металла.

Алюминиевые сплавы с высоким содержанием Si имеет  $T_{пл} < 600$  °С. Введение меди существенно снижает температуру плавления. например, при составе – 6 % Si, 28 % Cu припой имеет  $T_{пл} = 525$  °С. дополнительное введение цинка и германия снижает температуру плавления до 400...500 °С.

### **Флюсы**

Для низкотемпературной пайки применяют канифольные и галогенные флюсы. Канифоль удаляет оксиды Cu, Ag, Sn. Их можно применять и для пайки оцинкованного железа, никелированного железа.

Галогениды применяют для всех черных и цветных металлов, чаще всего используют  $NH_4Cl$  и  $ZnCl_2$ , а также смеси с другими добавками. Применяют флюсы на основе солянокислого гидрозина, анилина и других органических веществ.

Для высокотемпературной пайки используют борную кислоту и буру в различных сочетаниях. Иногда вводят дополнительно галогениды, фториды натрия, калия, лития, кальция, фторбораты натрия, калия.

### **5.8. Сварка полимерных материалов**

При сварке различных элементов конструкций исчезает поверхность, разделяющая два материала, и образуется сварной шов, структура которого формируется атомами соединяемых заготовок. Сварка полимерных материалов может осуществляться под действием косвенного нагрева, инфракрасного и лазерного излучений, с применением нагретого инструмента, токов высокой частоты, ультразвука, трения. Прочность сварного соединения зависит от возникающих в сварном шве сил межатомного и межмолекулярного взаимодействия. При сварке термопластов сварной шов образуется при нагреве. Переходный слой сварного соединения формируется в результате взаимной диффузии атомов соединяемых материалов, находящихся в вязкотекучем состоянии. Сварка реактопластов с нагревом сварного соединения не проводится, а соединение осуществляется вследствие химического взаимодействия молекул соединяемых материалов между собой или со сшивающим агентом, вводимым в зону сварки.

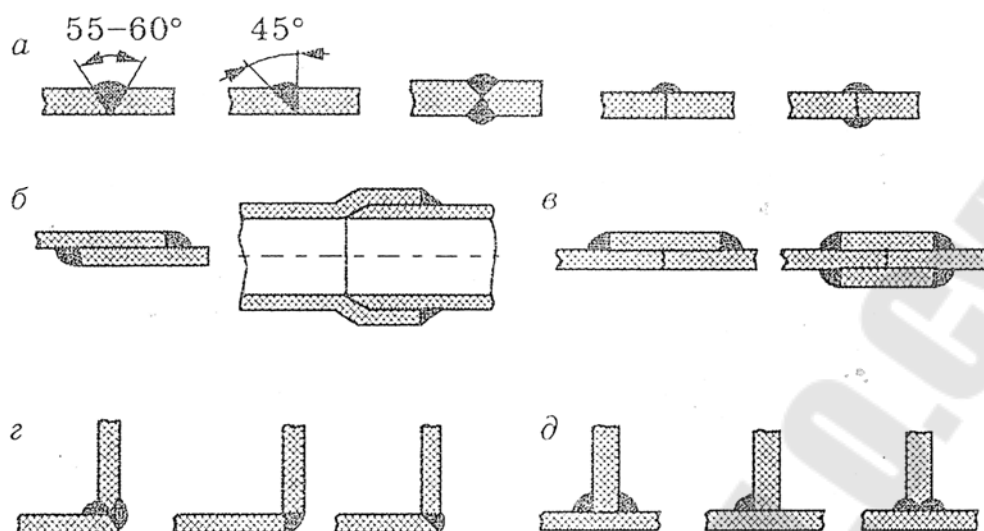


Рис. 5.34 Основные типы сварных соединений полимерных заготовок:  
 а – стыковое; б – нахлесточное; в – комбинированное; г – угловое;  
 д – тавровое

При сварке **горячим газом** в качестве теплоносителя используют воздух, если соединяются винипласт, пластикат, полистирол, или инертные газы — аргон, азот, если соединяются полиэтилен, полиамиды. Для сварки применяют электрические сварочные горелки. В них воздух или газы проходят через электроспираль и, нагреваясь до 200...300 °С, направляются соплом на сварочный участок. Давление воздуха или газа создается воздуходувной установкой, компрессором или регулируется редуктором от газового баллона. Сварка происходит с присадочным прутом (рис. 5.35). В некоторых случаях применение присадочного прутка не требуется. Для сварки с прутом по краям соединяемых деталей выбирают фаски, а в случае примыкания под углом загибают край листа. Прочность шва при сварке составляет 50...80 % прочности целого материала в зависимости от формы соединения.

Термин «сварка горячим газом» имеет историческое происхождение. В самом начале, когда способы обработки пластика только разрабатывались, воздух в сварочных аппаратах действительно подогревался при помощи газовой горелки. Это нельзя было назвать безопасным и практичным. Современные аппараты с электрическим подогревом позволяют регулировать температуру воздуха. Однако, обозначение «сварка горячим газом» осталось.

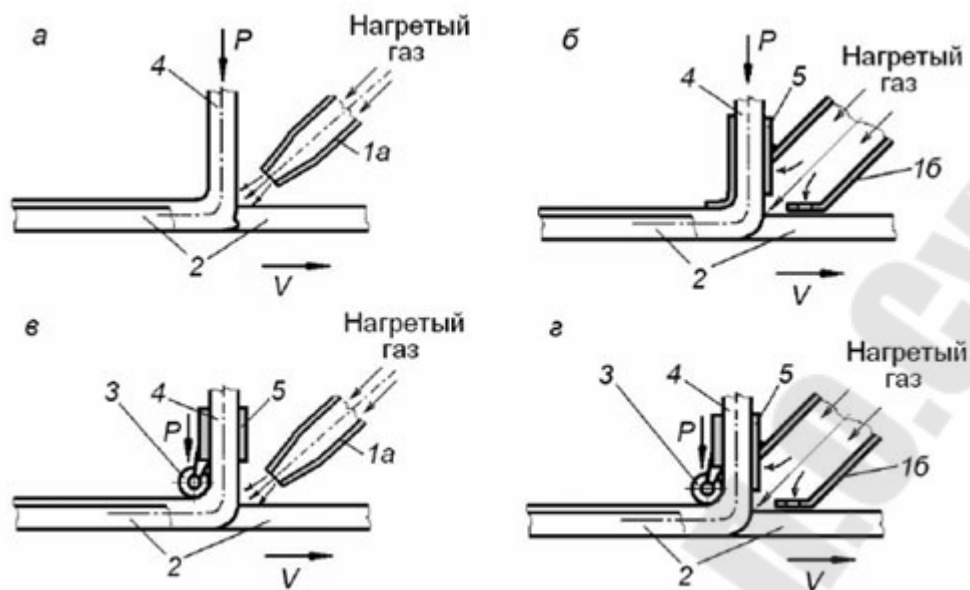


Рис. 5.35. Схемы сварки пластмасс присадочным прутом:

а – сварка без насадки, б – сварка с насадкой для твердых термопластов, в – сварка с насадкой для мягких термопластов, г – сварка с насадкой для твердых и мягких термопластов: 1а – стандартное сопло, 1б – производительное сопло, 2 – основной материал, 3 – прижимной ролик, 4 – присадочный пруток, 5 – направляющий канал, P – направление давления на присадочный материал, V – направление сварки

Сварка термопластичных материалов состоит из следующих этапов:

- подготовка поверхности свариваемых деталей,
- разогрев зон сварки,
- сварка деталей,
- охлаждение сварочного шва (сваренные детали находятся под давлением),
- освобождение сваренных деталей от давления,
- обработка сварочного шва

Сварка горячим воздухом применяется для соединения отрезков плит при изготовлении различных изделий, для сварки труб и профилей, а также пленочных материалов. Для сварки пригодны все без исключения термопласты.

К основным технологическим параметрам сварки нагретым газом с использованием присадочного материала относятся:

- расход и температура газа;
- материал и размеры сечения присадочного прутка;



- угол наклона подаваемого в разделку прутка;
- усилие прижима присадки;
- угол наклона горелки к плоскости детали;
- скорость сварки.

Температура газа на выходе из сопла должна быть на 50–100 °С выше температуры вязкотекучести свариваемого материала. Расстояние между поверхностью сварного шва и соплом наконечника нужно поддерживать постоянным, равным 5-8 мм.

При угле наклона присадочного прутка больше 90° прутки, уложенный в шов, удлиняется (при охлаждении может лопнуть). Так сваривают полипропилен. При угле наклона меньше 90° прутки разогреваются быстрее основного материала и на участке большей длины. Расход прутка увеличивается из-за его осадки при укладке в шов. При этом в шве возникают внутренние напряжения из-за продольного сжатия, и прутки изгибаются с образованием на его поверхности волны. Прочность сцепления прутка с кромками уменьшается, и его можно легко отделить. Перед сваркой прутки нагревают, отгибают под прямым углом и охлаждают на воздухе.



Рис. 5.36. Расположение присадочного прутка при сварке горячим газом

Сварка горячим воздухом также применяется для соединения пленочных заготовок из полиэтилена, поливинилхлорида и других термопластичных материалов. Для сварки требуется специальная фильера с широким щелевым отверстием, и ролик из резины для прижима сварочного шва. Перед сваркой отрезки пленки располагаются внахлестку на 3-5 см. Сварка производится следующим образом: одной рукой ведется сварочный аппарат, а другой, при помощи ролика, прижимается шов. Если температура сварки и сила давления ролика выбраны правильно, то на краю верхнего отрезка пленки образуется небольшое утолщение (ребро). Чтобы пленка при сварке не скалывалась, ее следует предварительно сметать в нескольких местах.

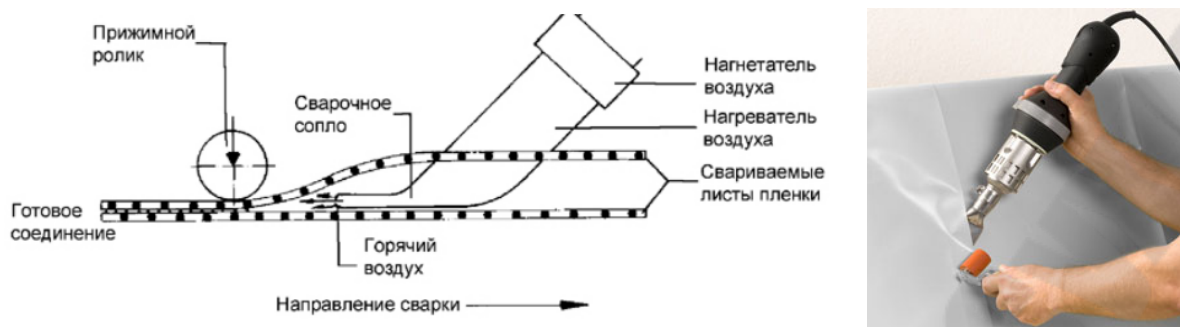


Рис. 5.37. Сварка полимерных пленок горячим воздухом

Самым простым способом подвода тепловой энергии является контакт свариваемых поверхностей пластмасс с **нагретым инструментом**. Благодаря простоте технологического процесса, дешевизне оборудования и оснастки, сварка нагретым инструментом, называемая также контактно-тепловой или термоконтанной сваркой, используется очень широко. Ее применяют для соединения труб, изготовления различных емкостей, деталей машин, конструкций и т.п. Наибольшее применение нашел способ прямого нагрева. Соединение при нем образуется в два этапа:

- разогрев (оплавление) соединяемых поверхностей плотно прижатым нагретым инструментом для сварки;
- контакт нагретых поверхностей свариваемых деталей с определенным усилием и выдержка под давлением до охлаждения деталей.

Разогрев должен обязательно приводить к оплавлению свариваемых торцов на определенную глубину. При этом расплавляются все неровности, и обеспечивается плотный контакт деталей, необходимый для перемешивания слоев материала и образования прочного соединения. Этот способ широко используется для монтажа трубопроводов (рис. 5.39), а также сварки пленочных упаковок (рис. 5.40).

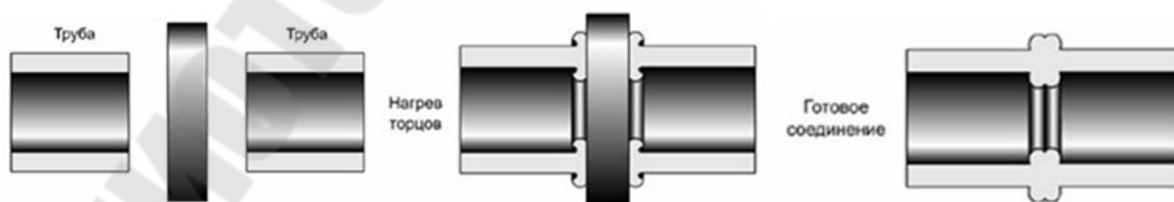


Рис. 5.39. Сварка полимерных трубопроводов контактным нагревом

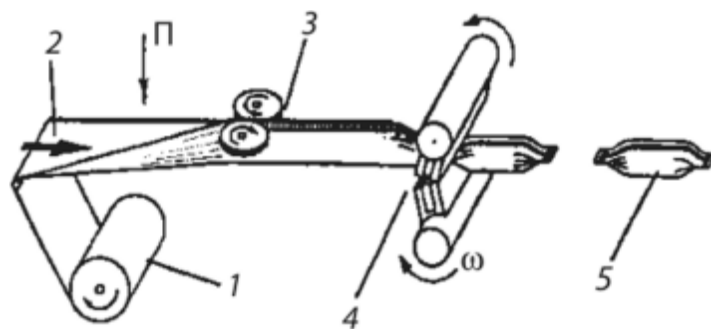


Рис. 5.40. Сварка пленочной упаковки контактным нагревом

К основным технологическим параметрам сварки пластмасс нагретым инструментом относятся:

- температура нагревателя;
- продолжительность нагрева;
- давление оплавления (усилие прижатия инструмента к детали);
- давление осадки (усилие сжатия свариваемых деталей);
- продолжительность выдержки давления после сварки.

Перед сваркой контактирующие поверхности деталей необходимо очистить от посторонних веществ и загрязнений, препятствующих соединению - пыли, масла и др. Для обезжиривания могут использоваться ацетон или спирт. При необходимости применяется торцовка (срез неровностей соединяемых кромок) с удалением образовавшейся стружки.

**Ультразвуковая сварка** является наиболее распространенным методом соединения серийных изделий из термопластичных материалов. Она отличается особым быстрым действием (от долей секунды до нескольких секунд) и выполняет сварные швы, как правило, без образования выпучиваний и других геометрических искажений. Этот процесс, легко автоматизировать, что делает её наиболее востребованной при крупносерийном производстве тары, упаковки, корпусных и других изделий. Также применяется в микроэлектронике, изготовлении полупроводниковых устройств, приспособлений тонкой механической направленности, в оптике. Ультразвуковой метод сварки обеспечивает соединение материалов, которые практически не пропускают электричество и обладают низкой способностью к теплопроводности. Можно сваривать различные полимерные материалы с металлами и неметаллами, за счет возникновения хорошей адгезии полимера, находящегося в вязкотекучем состоянии.

Технологию ультразвуковой сварки можно представить с помощью образа падающего резинового шарика. Шарик никогда не возвращается к своей прежней высоте падения, потому что часть потенциальной энергии преобразуется в энергию деформации и теплоту.

Вместо шарика, в зоне сварного шва небольшие участки детали сгибаются силой колебания с частотой 15 000 - 70 000 циклов в сек (кГц). Это приводит к тому, что части оплавляются и обтекают вдоль линии соединения, создавая сварной шов.

В ультразвуковой сварке высокочастотная электрическая энергия преобразуется в вертикальное механическое движение с частотой 15 000 циклов в секунду и более. В ходе процесса сварки детали, которые подлежат соединению, скрепляются под давлением, а затем подвергаются высокочастотным колебаниям. В результате совместного воздействия поверхностного и межмолекулярного трения в контактирующих слоях заготовок вырабатывается теплота, порожденная трением (рис. 5.41).

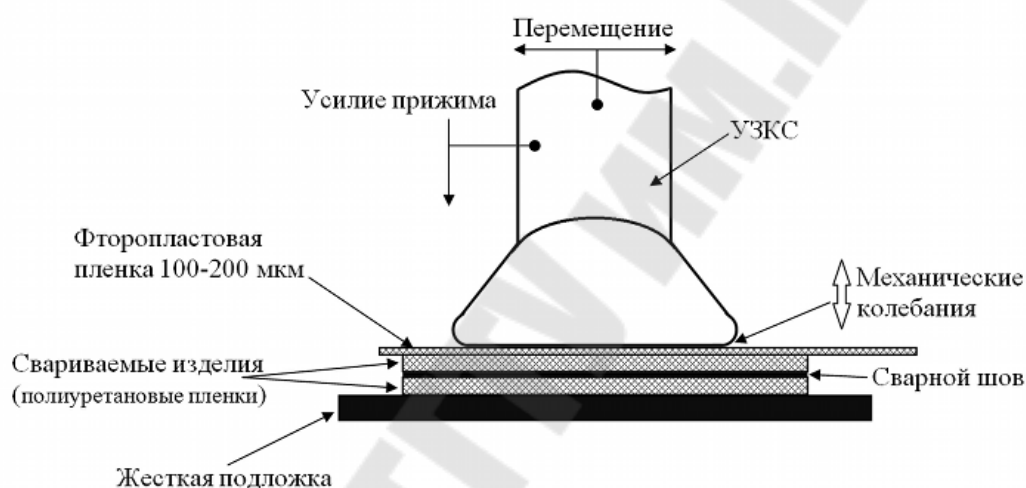


Рис. 5.41. Схема проведения ультразвуковой сварки полимерных пленок

Когда в зоне стыка между деталями выделяется достаточное количество теплоты, происходят размягчение и плавление соприкасающихся поверхностей. Приложение внешнего давления приводит к тому, что термически и механически колеблющиеся молекулы образуют связи. Частым требуемым условием сварочного соединения является его ювелирная прочность и равномерность. Ультразвуковая сварка – метод сварки, способный устранить мельчайшие микронеровности и деформирование поверхностей, также зона сварки полностью очищается от всевозможных загрязнений.

Сварка большинства полимерных материалов не требует высоких амплитуд колебаний инструмента и практически не наносит вред обслуживающему персоналу и окружающей среде.

Таблица 5.1.

Рекомендуемые значения амплитуды в ультразвуковой сварке при 20 кГц (в зависимости от материала амплитуды могут отличаться)

Материал	Амплитуда в мкм
Полистирол (ПС)	15-35
Ударопрочный полистирол	20-40
Акрилбутадиенстирол (АБС)	30-50
Стирол-акрилонитрил (САН)	30-50
Полиацетил (ПОМ)	40-60
Полиамид (ПА)	40-70
Полибутентерефталат (ПБТ)	50-90
Полиэтилен (ПЭ)	40-80
Полипропилен (ПП)	40-80

**Сварка трением** – разновидность сварки давлением, при которой нагрев осуществляется трением, вызванным вращением (перемещением) одной из соединяемых частей (деталей, заготовок) свариваемого изделия. При сварке полимерных материалов, как правило, используется специальный инструмент, который не теряет своей жесткости при нагреве до температур вязкотекучего состояния полимера (220–300 °С). Таким образом, в отличие от сварки трением металлических заготовок, полимерные заготовки не осуществляют взаимных перемещений под действием привода машины трения.

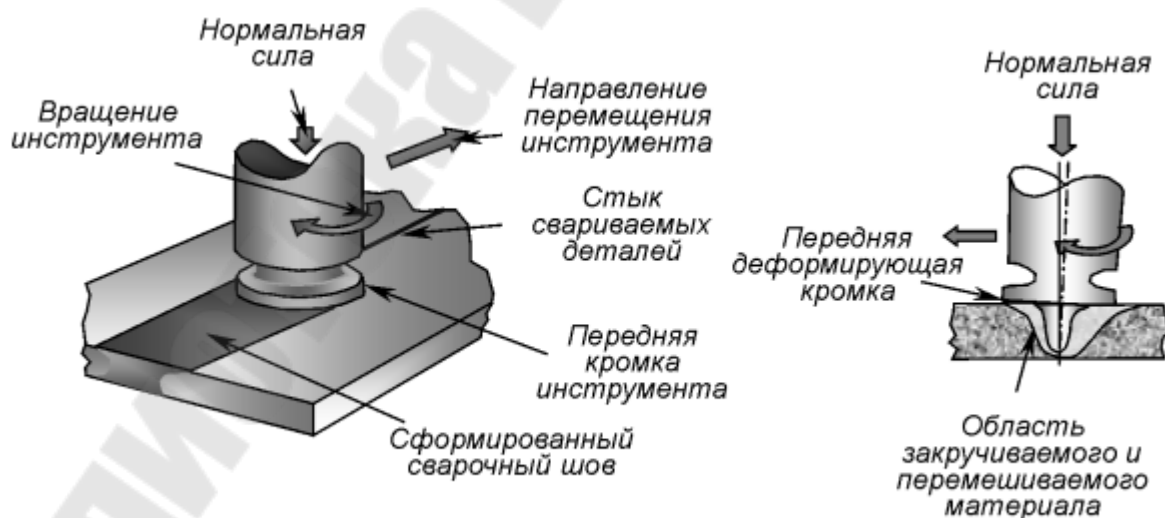


Рис. 5.42. Схема проведения сварки трением полимерных пластин

**Лазерная сварка** пластмасс особенно необходима там, где требуется осторожное обращение (например, при стыковке электронных компонентов) или в стерильных условиях. Кроме того при помощи лазерной сварки можно стыковать изделия со сложными линиями. Преимуществами такого метода являются отсутствие повреждений и деформации стыкуемых изделий, незаметный шов, возможность сварки сложных деталей, а также возможность соединения пластмасс разных видов (АБС, ПА, ПБТ, ПС, ПММА, стеклопластик и др.).

Достоинствами лазерной сварки являются: хорошее качество сварного шва и его незаметность, отсутствие механической нагрузки в процессе проведения сварки, высокая точность соединения и хорошая воспроизводимость свойств сварного шва. К недостаткам следует отнести ограниченность в используемых материалах, опасное влияние лазерного излучения на глаза оператора, необходимость постоянного слежения за процессом сварки, что затрудняет процесс автоматизации.

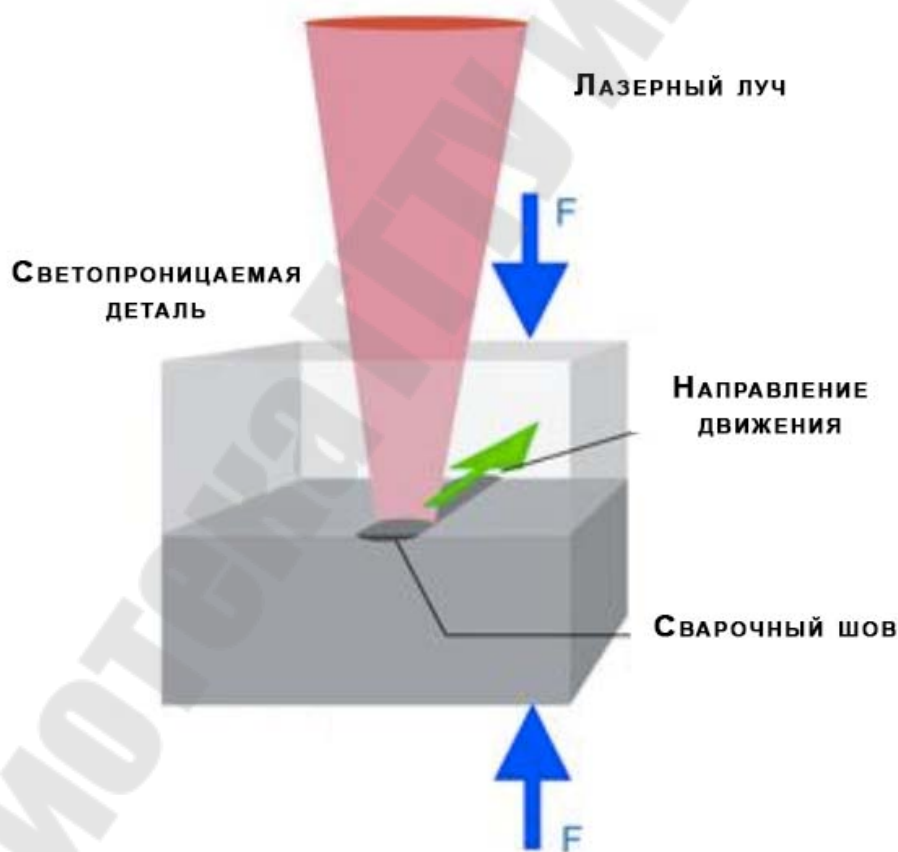


Рис. 5.43 Схема проведения сварки полимеров лазерным излучением

**Инфракрасная сварка полимеров** относится к бесконтактным методам. Соединяемые участки нагреваются посредством инфракрасных лучей. При ИК-сварке используется коротковолновое (0,78–2 мкм) и средневолновое (2–4 мкм) излучение для глубоких слоев и для поверхности соответственно.

Сварка используется для получения нахлесточных соединений тонких пленок, а также стыковых соединений листов, труб и профилей. Основные технологические параметры сварки: мощность излучения (температура нагревателя), время нагрева свариваемых поверхностей, усилие и скорость осадки после нагрева.

Прочность сварных соединений при сварке пленок ИК-излучением составляет 0,6–0,7 прочности свариваемой пленки. Стыки труб из полиэтилена, сваренные плоскими ИК-излучателями кольцевого и ленточного типа, при кратковременных испытаниях имеют прочность 0,9–1 прочности основного материала труб.

Сварка ИК-излучением имеет единственный недостаток: при нагреве оплаиваемые поверхности на протяжении всего цикла находятся в контакте с окружающей средой, что ведет к развитию окислительных и деструктивных процессов в расплавах термопластов. Для устранения этого недостатка используются системы для сварки в среде инертных газов. При сварке по схеме, приведенной на рис. 5.44 а, используется жесткая выпуклая подложка, на которую натягиваются свариваемые материалы. Материалы прижимаются к подложке парой губок, которые одновременно служат для ограничения зоны нагрева. Давление в контакте пленок возникает при их растяжении за счет разогрева. При этом возникает утонение в зоне соединения, что является недостатком такой схемы.

Лучшее качество соединения обеспечивает схема, при которой в роли подложки используется эластичный материал (рис. 5.44 б). Эластичность позволяет создать натяжение пленок в зоне облучения (направление натяжения показано стрелкой) за счет сжатия подложки давлением, приложенным через ограничители зоны сварки. Подложка, кроме того, должна обладать некоторой адгезией к расплаву полимера. В противном случае образуются узкие жгутообразные швы с низкой морозостойкостью. Всем этим требованиям в наибольшей мере удовлетворяют подложки из черной микропористой резины, пенополиуретана и прорезиненных тканей.

Соединение рантовыми швами производят путем оплавления кромок пленок, выпущенных на небольшое расстояние из зажимных губок (рис. 5.45).

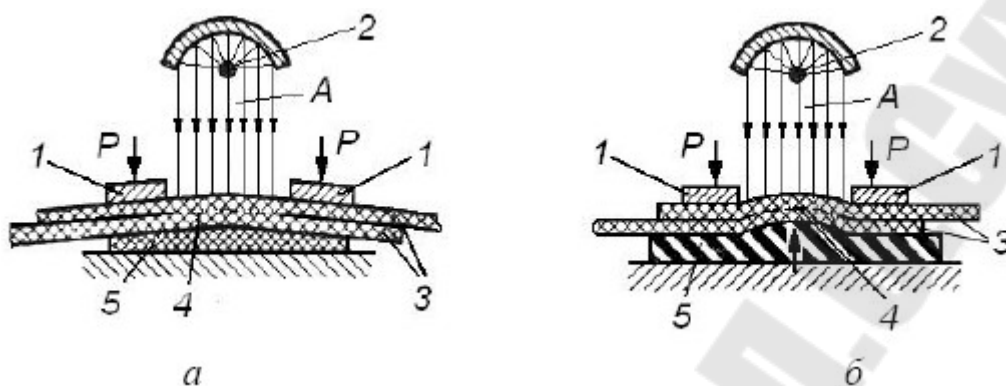


Рис. 5.44. Схема сварки инфракрасным излучением:  
 а – на жесткой подложке; б – на упругой подложке; 1 – губки, ограничивающие зону облучения; 2 – нагреватель; 3 – свариваемые пленки; 4 - сварной шов; 5 – подложка; А – ИК-луч; Р – давление прижима

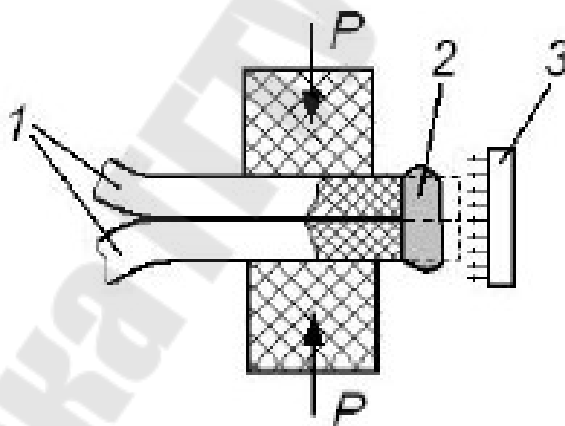


Рис. 5.45. Схема сварки инфракрасным с получением рантовых швов: 1 – свариваемые пленки; 2 – сварной шов; 3 – ИК - излучатель

Сварка **растворителями** представляет собой ряд последовательных операций: смачивание соединяемых поверхностей растворителем, ожидание пока полимер набухнет и станет липким, приведение деталей в контакт и выдержка под давлением до того момента, когда шов затвердеет. Сварка пластмасс с помощью растворителей обычно используется для соединения пластмассовых деталей из аморфных термопластов, так как частично кристаллические термопласты имеют



хорошую стойкость к действию растворителей. Обе пластмассовые детали просто прижимают к губке или войлочной прокладке, предварительно пропитанной растворителем. Количество растворителя должно быть минимальным, чтобы исключить образование потеков и возможно трещин. После нанесения растворителя пластмассовые изделия должны быть немедленно приведены в контакт и выдержаны в таком состоянии короткое время для набухания без чрезмерной потери легколетучего растворителя. Затем детали сжимаются и под давлением находятся в течение требуемого времени, от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от конструкции соединения и выбранного растворителя. После, в течение нескольких часов соединение достигает прочности соединяемых материалов. Для ускорения испарения растворителя может быть использован нагрев деталей.

### **5.9. Контроль качества сварных швов**

*Дефекты сварных швов* подразделяются на внешние и внутренние. *К внешним дефектам* относятся: наплывы, подрезы, непровары и несплавления, поверхностные трещины и поры, свищи и прожоги. *К внутренним дефектам* относятся: скрытые трещины и поры, внутренние непровары и несплавления, шлаковые включения и др.

Для контроля качества сварных швов применяют разрушающие и неразрушающие методы контроля.

*Разрушающие методы контроля* заключаются в механических испытаниях контрольных образцов и применяются для оценки свойств основного и сварочного материалов, а также квалификации сварщиков.

Сварочные конструкции подвергаются в зависимости от назначения и ответственности следующим методам контроля: визуальному осмотру, испытаниям на плотность, магнитному контролю, контролю рентгеновским и гамма-излучением, ультразвуковому контролю.

*Визуальным осмотром* выявляются наличие отклонений геометрических размеров сварного соединения, наплывы, прожоги, подрезы, наружные трещины шва и околошовной зоны, непровары корня шва. При этом осмотре возможно применение оптических приборов с увеличением до 10 крат.

*На плотность проверяют* емкости для хранения жидкостей, сосуды и трубопроводы, работающие при избыточном давлении. Испытания проводятся путем гидравлического или пневматического

опрессовывания, с помощью течеискателей и керосина. Воздушным и гидравлическим давлением, а также течеискателем можно выявить сквозные дефекты размером от 0,0001 мм. Смачивание керосином позволяет определить дефекты размером более 0,1 мм, а обдувом сжатым воздухом и поливом водой – более 0,5 мм.

**При гидравлических испытаниях** емкости наполняют водой и создают в них избыточное давление в 1,5...2 раза, превышающее рабочее. После 5...10 минут выдержки осматривают на наличие течи, капель, опотеваний.

**При пневматических испытаниях** в сосудах создается избыточное давление 0,01...0,02 МПа. Соединение смачивают мыльным раствором или опускают в воду. Дефекты определяются по мыльным или воздушным пузырькам.

**При испытании течеискателем** в емкости создается вакуум, а снаружи емкость обдувают воздухом с гелием. При наличии неплотностей гелий проникает в сосуд, откуда он отсасывается в течеискатель со специальной аппаратурой для его обнаружения.

**При испытании керосином** швы с одной стороны обмазываются мелом, а с другой – керосином. При наличии несплошностей на мелованной стороне появляются темные пятна керосина.

**Метод магнитного контроля** основан на определении полей магнитного рассеяния на дефектных участках. Метод заключается в намагничивании сварных соединений, нанесении на поверхность порошка железной окалины или его масляной суспензии. По скоплению порошка на отдельных участках обнаруживают дефекты, залегающие на глубине до 6 мм, площадью от 2 мм<sup>2</sup> и более, трещины шириной не менее 0,1 мм.

**Рентгеновский контроль** основан на различии поглощающей способности рентгеновского излучения участками металла с дефектами и без них. Проверяемое сварное соединение располагается между рентгеновской трубкой и кассетой с рентгеновской пленкой (рис. 5.36). Излучение проходит через соединение и облучает пленку. Участки с повышенным потемнением на проявленной пленке указывают дефектные места в соединениях. Данный метод позволяет определять дефекты размером от 0,5 мм и более, просвечивать соединения из стали толщиной до 200 мм, алюминия – до 300 мм, меди – до 25 мм.

**Методика просвечивания гамма-излучением** аналогично рентгеновскому методу. Только в качестве источников излучения используют радиоактивные изотопы кобальт – 60, тулий – 170 и др. Ампула

с изотопом располагается в свинцовом контейнере. Преимуществом этого метода является портативность аппаратуры, что позволяет его применять в любых условиях. Кроме того он менее дорогостоящий чем рентгеновский. Однако у него ниже чувствительность при просвечивании соединений толщиной до 50 мм.

*Ультразвуковой метод контроля* основан на способности ультразвуковых волн отражаться от поверхностей раздела двух сред. Метод позволяет выявлять дефекты и их параметры площадью от 1 до 2 мм<sup>2</sup> и более на глубине 1...250 мм.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Что используется в качестве источников теплоты при сварке плавлением?
2. Что понимается под зоной термического влияния и какие структурные превращения происходят в ней?
3. Охарактеризуйте основные типы сварных соединений.
4. Изобразите схему ручной дуговой сварки, укажите ее возможности и методику определения силы сварочного тока.
5. Особенности автоматической дуговой сварки под флюсом.
6. Особенности сварки в защитных газах.
7. Особенности электрошлаковой сварки.
8. Плазменная сварка и области ее применения.
9. Особенности газовой сварки и области ее применения.
10. Особенности контактной стыковой сварки оплавлением и сопротивлением и области их применения.
11. Особенности точечной и шовной контактной сварки и области их применения.
12. Методы контроля сварных соединений.

## Глава 6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### 6.1. Общая характеристика механической обработки заготовок

*По физике основных процессов, протекающих в зоне обработки детали*, технологические методы обработки условно можно подразделить на: механические, электрофизические и электрохимические, комбинированные. В свою очередь, *механические методы* можно подразделить на: слесарные, резанием и пластическим деформированием. *Электрофизические и электрохимические методы* подразделяются на: электроэрозионные, электрохимические, химические, импульсно-механические, лучевые, плазменные, взрывные. *К комбинированным* - относятся электроабразивные, электрохимическое хонингование и др. Наиболее широкий класс технологических процессов обработки заготовок представляет механическая обработка.

### 6.2. Физико-механические основы обработки металлов резанием

#### 6.2.1. Классификация движений в металлорежущих станках. Виды обработки резанием

*Обработка резанием* представляет собой процесс срезания режущим инструментом с поверхности заготовки слоя материала в виде стружки для получения необходимой формы, взаиморасположения и шероховатости поверхности детали. Чтобы срезать слой материала необходимо режущему инструменту и заготовке сообщить относительные движения. Инструмент и заготовка устанавливают в рабочие органы станка, обеспечивающего эти движения: в шпинделе, на столе, в револьверной головке и т. д. Основные виды обработки резанием приведены на рис. 6.1.

*Движения рабочих органов* подразделяют на движения резания, установочные и вспомогательные. Движения, которые обеспечивают срезание с заготовки слоя материала или вызывают изменение состояния обрабатываемой поверхности заготовки, называют *движениями резания*. К ним относятся главное движение и движение подачи. В соответствии с ГОСТ 25762-83 за главное  $D_r$  принимают движение заготовки или инструмента, происходящее с наибольшей скоро-

стью в процессе резания. Под движением подачи  $D_s$  понимается движение, обеспечивающее врезание режущей кромки инструмента в материал заготовки. Скорость главного движения обозначается  $V$ , величина подачи –  $S$ . По характеру движения они могут быть: вращательными, поступательными, возвратно – поступательными, непрерывными или прерывными.

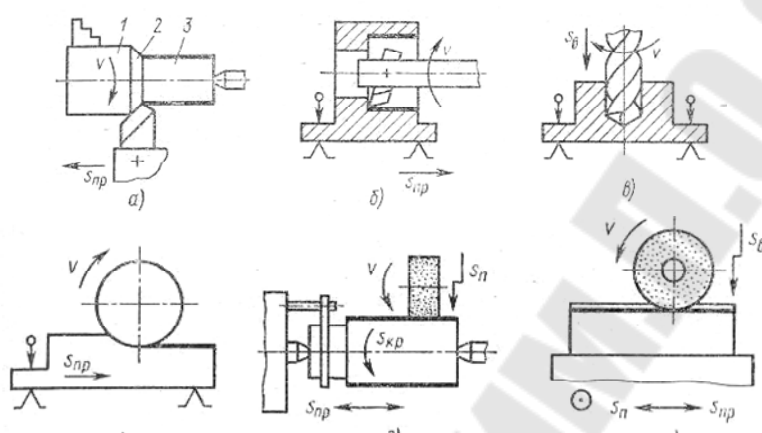


Рис. 6.1. Основные схемы обработки резанием:

- а – точение; б – растачивание; в – сверление; г – фрезерование;  
 д – шлифование на круглошлифовальном  
 и е – на плоскошлифовальном станках

Движение, обеспечивающее взаимное положение инструмента и заготовки для срезания с нее определенного слоя материала, называют *установочным*. К *вспомогательным движениям* относятся: транспортирование заготовки, закрепление заготовки и инструмента, быстрое перемещение рабочих органов станка и др.

*Подачи* существуют: продольная  $S_{пр}$ , поперечная  $S_{п}$ , вертикальная  $S_{в}$ , круговая  $S_{кр}$ , окружная  $S_0$  и др.

**При точении** главным движением является вращательное движение заготовки, а движением подачи – прямолинейное поступательное перемещение резца вдоль, поперек или под углом к оси вращения заготовки.

**При растачивании** главным движением является вращательное движение резца (или заготовки), а движение подачи – прямолинейное, поступательное перемещение резца вдоль своей оси вращения (или оси вращения заготовки).

**При сверлении** (зенкерования, развертывании) главным является вращательное движение инструмента, а движение подачи - прямолинейное, поступательное движение инструмента вдоль своей оси.

**При фрезеровании** главное движение – вращательное движение инструмента, движение подачи – поступательное прямолинейное перемещение заготовки.

**При обработке на круглошлифовальных станках** главным является вращательное движение инструмента, а движение подачи – прямолинейное возвратно-поступательное движение заготовки и прямолинейное дискретное поступательное движение инструмента или заготовки перпендикулярно оси вращения заготовки.

**При обработке на плоскошлифовальных станках** главным является также вращательное движение инструмента, а движением подачи – прямолинейное возвратно-поступательное движение заготовки, дискретное (пошаговое) движение заготовки в поперечном направлении и инструмента в вертикальном направлении.

**В процессе резания различают на заготовке следующие элементы:** обрабатываемую поверхность 1, с которой снимают слой материала; обработанную поверхность 3, с которой снят слой материала; поверхность резания 2, которая соединяет поверхности 1 и 3. Расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностью, измеренное в мм перпендикулярно к последней, называют *глубиной резания* и обозначают буквой  $t$ , мм (рис. 6.2).

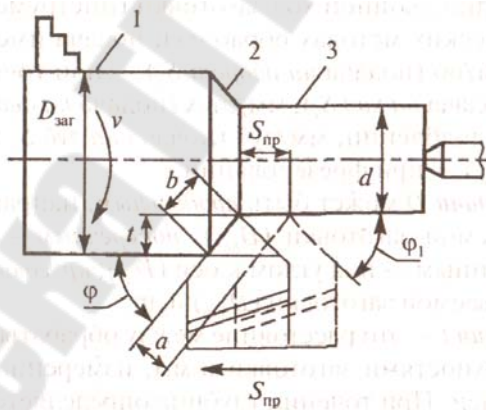


Рис. 6.2. Элементы резания и геометрические параметры срезаемого слоя

Скорость резания  $V$ , подача  $S$  и глубина резания  $t$  характеризуют напряженность процесса резания и относятся к параметрам режима обработки.

*Скорость резания*  $V$  характеризует расстояние, пройденное точкой режущей кромки инструмента относительно заготовки, в единицу времени, обычно м/мин или м/с. При вращательном главном движении

$$V = \pi \cdot D_{\text{заг}} \cdot n / 1000, \text{ м/мин},$$

где  $D_{\text{заг}}$  – наибольший диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм;  $n$  – частота вращения заготовки,  $\text{мин}^{-1}$ .

Если главное движение возвратно-поступательное, а скорость рабочего и холостого хода различны, то

$$V = L \cdot m \cdot (k+1) / 1000, \text{ м/мин},$$

где  $L$  – расчетная длина хода инструмента, мм;  $m$  – число двойных ходов инструмента в минуту;  $k$  – коэффициент, показывающий отношения скоростей рабочего и холостого ходов.

*Подачей*  $S$  называют расстояние, пройденное рассматриваемой точкой режущей кромки инструмента или заготовки вдоль траектории этой точки в направлении движения подачи за один оборот, либо один ход заготовки или инструмента. Размерность подачи – мм/об – при точении и сверлении, мм/дв.хд - при шлифовании и строгании.

*Глубину резания*  $t$  задают на каждый рабочий ход инструмента и измеряют в миллиметрах. При точении глубина резания определяется по формуле

$$t = (D_{\text{заг}} - d) / 2,$$

где  $d$  – диаметр обработанной поверхности заготовки, мм.

При токарной обработке

$$t_0 = L \cdot i / (n \cdot S_{\text{пр}}),$$

где  $L = l + l_1 + l_2$  – длина рабочего хода (рис. 6.4);  $l$  – длина обработанной поверхности, мм;  $l_1 = t \cdot \text{ctg} \varphi$  – величина врезания резца, мм;  $l_2 = 1 \dots 3$  – выход резца, мм;  $i$  – число рабочих ходов, необходимых для снятия материала, оставленного на обработку.

Форма и размеры срезаемого слоя зависят от  $S_{\text{пр}}$ ,  $t$  и  $\varphi$ , а шероховатость обработанной поверхности - от режимов резания, геометрии инструмента, вибраций и физико-механических свойств материала.

**Элементы резца**

При большом разнообразии режущих инструментов они имеют много общего. Поэтому основные элементы рассмотрим на примере токарного прямого проходного резца (рис. 6.3).

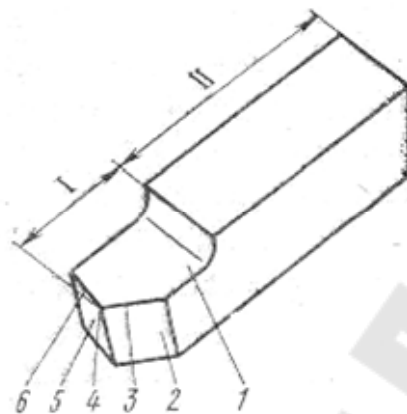


Рис. 6.3. Элементы токарного прямого проходного резца

Токарный прямой исходный резец имеет режущую часть (головку) I и присоединительную (тело) резца II, которая служит для крепления резца в резцедержателе.

**Режущая часть** любого лезвийного инструмента состоит из нескольких поверхностей и режущих кромок. Для токарного резца такими являются:

- *передняя поверхность 1*, по которой сходит стружка в процессе резания;
- *главная задняя поверхность 2*, обращенная к поверхности резания заготовки;
- *вспомогательная задняя поверхность 5*, обращенная к обработанной поверхности заготовки;
- *главная режущая кромка 3*, образованная пересечением передней и главной задней поверхностями;
- *вспомогательная режущая кромка 6*, образованная пересечением вспомогательной задней и передней поверхностей;
- *вершина лезвия 4*.

Заточка инструмента производится по передней и задним поверхностям. Для определения углов, под которыми расположены поверхности режущей поверхности части инструмента относительно друг друга, вводят координатные плоскости (рис. 6.4).



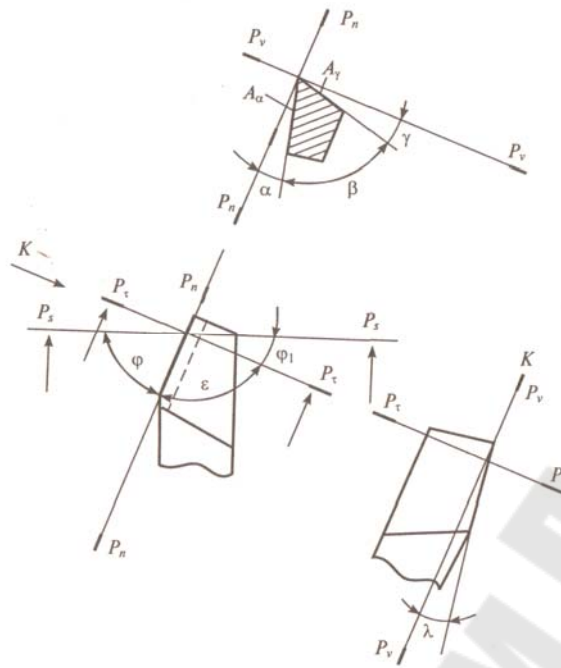


Рис. 6.4. Координатные плоскости и углы резца в статике

*Основная плоскость*  $P_{vc}$  – плоскость, проходящая через точку режущей кромки лезвия перпендикулярно к направлению скорости главного движения резания.

*Плоскость резания*  $P_{rc}$  – плоскость, проходящая касательно к режущей кромке лезвия перпендикулярно к основной плоскости.

*Главная секущая плоскость*  $P_{tc}$  – плоскость, проходящая перпендикулярно к линии пересечения основной плоскости и плоскости резания.

*Вспомогательная секущая плоскость*  $P_{tc1}$  – плоскость, проходящая перпендикулярно к проекции вспомогательной режущей кромки на основную плоскость.

На резце различают **четыре группы углов**, определяющих положение элементов режущей части в пространстве относительно координатных плоскостей и друг друга. Эти углы называются углами резца в статике. Они оказывают существенное влияние на процесс резания и качество обработанных поверхностей заготовок.

*Главные углы или углы главной режущей кромки* – рассматриваются в сечении главной секущей плоскостью.

*Вспомогательные углы или углы вспомогательной режущей кромки* – рассматриваются в сечении вспомогательной секущей плоскостью.

*Углы в плане*, которые рассматриваются в проекции на основную плоскость.

*Угол наклона главной режущей кромки* рассматривается в проекции на плоскость резания.

Одним из важнейших геометрических параметров лезвия резца является *передний угол*  $\gamma$ , представляющий собой угол между следом передней поверхности лезвия и следом плоскости, перпендикулярной к следу плоскости резания, измеряемый в главной секущей плоскости (между передней поверхностью и основной плоскостью). С увеличением угла  $\gamma$  снижаются силы резания, расход мощности, улучшаются условия схода стружки и качество поверхности, но снижается прочность главной режущей кромки и стойкость инструмента, ухудшаются условия теплоотвода из зоны резания.

Величину переднего угла  $\gamma$  назначают в пределах от  $+30$  до  $-10$  градусов исходя из свойств обрабатываемого материала. При обработке мягких и вязких материалов угол  $\gamma$  выбирается положительным, близким к верхнему пределу. При обработке хрупких твердых материалов выбирают меньшие углы, иногда отрицательные.

*Главный задний угол*  $\alpha$  также измеряется в главной секущей плоскости и представляет собой угол между следом плоскости резания и следом главной задней поверхности. Этот угол создается с целью снижения трения между главной задней поверхностью инструмента и поверхностью резания заготовки. Обычно величина угла  $\alpha$  назначается в пределах  $5...15^\circ$ . С увеличением угла  $\alpha$  снижается прочность режущей кромки.

*Углом заострения*  $\beta$  называется угол между передней и главной задней поверхностями  $\beta = 90^\circ - (\alpha + \gamma)$ .

*Угол резания*  $\delta$  – угол между плоскостью резания и передней поверхностью,  $\delta = 90^\circ - \gamma$ .

*Вспомогательный задний угол*  $\alpha_1$  измеряют во вспомогательной секущей плоскости между следом вспомогательной задней поверхности и следом плоскости, проходящей через вспомогательную режущую кромку перпендикулярно основной плоскости. Этот угол выполняется с целью снижения трения между вспомогательной задней и обработанной поверхностями заготовки.

*Угол в плане*  $\phi$  – угол между проекцией главной режущей кромки на основную плоскость и направлением движения подачи. Этот угол во многом определяет шероховатость обработанной поверхности и величину силы резания. С уменьшением угла  $\phi$  снижается шерохо-

ватость обработанной поверхности, увеличивается активная рабочая длина режущей кромки, уменьшается износ инструмента, однако увеличивается сила резания, направленная перпендикулярно к оси заготовки, вызывающая ее повышенную деформацию, а иногда и вибрацию. Величина угла  $\varphi$  выбирается в зависимости от условий обработки в диапазоне  $10 \dots 90^\circ$ , чаще употребляют резцы с  $\varphi = 45^\circ$ .

*Вспомогательный угол в плане  $\varphi_1$*  измеряется между проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и направлением, обратным направлению подачи. Угол  $\varphi_1$  выбирается в диапазоне  $0 \dots 30^\circ$ . Чем меньше угол  $\varphi_1$ , тем меньше шероховатость обработанной поверхности, выше прочность вершины резца, но выше сила трения и износ инструмента.

*Угол наклона режущей кромки  $\lambda$*  измеряется в плоскости резания между режущей кромкой и основной плоскостью. Выбирается он в диапазоне  $\pm 5^\circ$ . При положительном угле вершина резца является самой низкой точкой режущей кромки, а при отрицательном – самой высшей. При нулевом угле  $\lambda$  режущая кромка параллельна основной плоскости. При нулевом и положительном значении угла  $\lambda$  стружка сходит в направлении обратной подачи. Такие резцы обычно применяют при черновой обработке заготовок. Отрицательный угол  $\lambda$  обеспечивает сход стружки в направлении подачи, т.е. опережает резец, но качество обработанной поверхности при этом выше. Эти резцы применяют для чистового точения с удалением стружки небольшого сечения.

В процессе резания участвуют два движения – главное и подачи, поэтому траекторией движения вершины резца относительно заготовки будет винтовая линия. Соответственно, не сразу снимается вся площадь среза, а сьем происходит последовательно и на обработанной поверхности остаются *микронеровности* – микровыступы и микровпадины. Их совокупность называется *шероховатостью*. Для ее характеристики широко используется параметр  $R_a$ , представляющий собой среднее арифметическое абсолютных значений отклонения профиля в пределах определенной базовой длины обработанной поверхности. Допустимая величина  $R_a$  для черновой обработки составляет  $100 \dots 22,5$  мкм, для чистовой –  $6,3 \dots 0,4$  мкм, а для доводочной –  $0,2 \dots 0,012$  мкм.

## Физическая сущность процесса резания

При движении резца в зоне резания возникает сложное напряженное состояние и происходит упругое и пластическое деформирование металла, находящегося перед ним. При напряжениях превышающих силу внутреннего сцепления кристаллитов, происходит сдвиг отдельного элемента стружки. Далее процесс повторяется и образуется следующий элемент стружки. Характер деформирования срезаемого слоя и вид стружки зависят от физико-механических свойств материала обрабатываемой заготовки, геометрии инструмента и технологических режимов резания.

При обработке металлов может образовываться сливная, суставчатая и элементная стружки. *Сливная стружка* образуется при обработке пластичных металлов, представляет собой сплошную ленту с гладкой прирезцовой стороной и с малыми зазубринками на противоположной (рис. 6.5а).

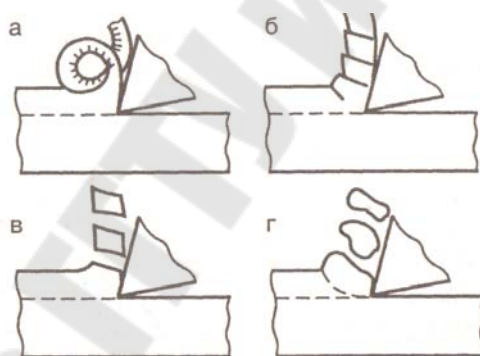


Рис. 6.5. Виды стружки

*Суставчатая (скалывания) стружка* образуется при резании металлов средней твердости и представляет собой ленту с гладкой прирезцовой стороной и ярко выраженными зазубринами с противоположной (рис. 6.5б). *Элементная стружка* (стружка надлома) образуется при обработке хрупких материалов (чугуны, некоторые бронзы) и состоит из элементов, практически не связанных между собой (рис. 6.5в).

С точки зрения техники безопасности сливная непрерывная стружка очень опасна и принимаются меры к ее дроблению на отрезке длиной не более 15 мм путем изготовления на резцах специальных лунок, уступов, стружколомателей.

Стружка, образуемая при резании, подвергается значительному пластическому деформированию, в результате которого длина ее уменьшается по сравнению с обработанной поверхностью, а толщина увеличивается. Коэффициенты укорочения и утолщения для пластичных металлов могут достигать до 5...7, а для хрупких близки к 1.

### Силовое взаимодействие инструмента и заготовок

Деформирование и срезание слоя металла с заготовки происходит при приложении **внешних сил резания**  $P$  со стороны инструмента к заготовке. Направление силы резания совпадает с направлением вектора скорости главного движения резания  $v$ . Работа, затрачиваемая на резание  $P \cdot v$ , расходуется на упругое и пластическое деформирование металла, его разрушение, преодоление сил трения задних поверхностей резца о заготовку и передней поверхности о стружку. В результате сопротивления металла процессу деформирования возникают реактивные силы, действующие на инструмент (рис. 6.6).

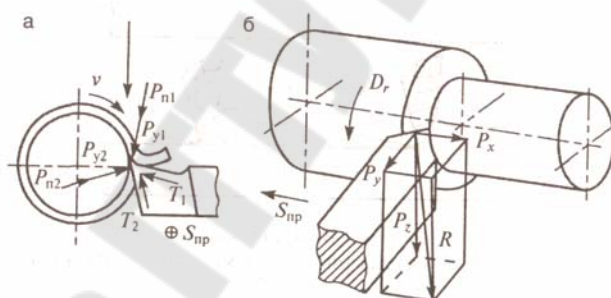


Рис. 6.6. Силы, возникающие в процессе резания

Векторы реактивных сил упругого ( $P_y$ ) и пластического ( $P_n$ ) деформирования направлены перпендикулярно к передней и задней поверхностям лезвия инструмента. Наличие нормальных сил обуславливает возникновение сил трения ( $T$ ), направленных по передней и задней поверхностям лезвия резца. Равнодействующая сил резания представляет собой сумму этих сил

$$P = P_{y1} + P_{y2} + P_{n1} + P_{n2} + T_1 + T_2.$$

Для расчетов металлорежущего оборудования и технологических режимов используются не равнодействующая сил резания, а ее составляющие по трем взаимно перпендикулярным направлениям – координатным осям станка.

*Вертикальная составляющая  $P_z$*  действует в плоскости резания. По ней осуществляют расчет крутящего момента на шпинделе станка, эффективной мощности резания, деформации, а также расчет на прочность механизмов коробки передач станка.

*Радиальная составляющая  $P_y$*  действует в плоскости ХУ перпендикулярно оси заготовки. По этой силе ведется расчет изгиба заготовки в плоскости ХУ.

*Осевая составляющая  $P_x$*  действует вдоль оси заготовки в направлении, противоположном подаче. По ней рассчитывают на прочность механизмы подачи станка и изгибающий момент, действующий на стержень резца. Для практических расчетов используют экспериментально полученное соотношение

$$P_x:P_y:P_z = 0,35:0,45:1,0.$$

Выполняют расчет максимальной силы  $P_z$  ( $P_z = \varphi(C,t,S,v,k)$ ) по эмпирической формуле, в которую входят свойства обрабатываемого материала  $C$ , глубина резания  $t$ , величина подачи  $S$ , скорость резания  $v$  и коэффициент  $k$ , учитывающий условия обработки, геометрию резца и др.

Величины коэффициентов и показателей степеней приводятся в справочниках.

**Крутящий момент на шпинделе**, необходимый для преодоления сопротивления резанию, определяют по формуле

$$M_{кр} = 0,5 \cdot P_z \cdot D_{заг} \cdot 10^{-3} \text{ (Н}\cdot\text{м)} \text{ (диаметр заготовки в миллиметрах)}.$$

Зная составляющие силы резания можно рассчитать *эффективную мощность*, необходимую для деформирования и срезания слоя металла с заготовки и необходимую мощность двигателя станка.

**Эффективная мощность  $N_э$**  при точении на токарном станке цилиндрической заготовки определяется по формуле

$$N_э = P_z \cdot V / 60 \cdot 10^3 + P_x \cdot n \cdot S_{пр} / 60 \cdot 10^6 \text{ (кВт)},$$

где  $n$  – частота вращения,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $S_{пр}$  – продольная подача,  $\text{мм/об}$ ;  
 $V$  – скорость резания,  $\text{м/с}$ ;  $P$  – составляющие силы резания,  $\text{кгс}$ .

**Мощность электродвигателя** определяется с учетом к.п.д. ( $\eta$ ) по формуле

$$N_{э.д.} = N_э / \eta.$$

Для токарно-винторезных станков  $\eta=0,8$ , для шлифовальных – 0,9, для строгальных – 0,5.

### **Тепловые явления при резании**

Основными источниками образования теплоты при обработке резанием являются работа деформирования срезаемого слоя, трение стружки о переднюю поверхность резца и инструмента о поверхность резания заготовки. Выделяющаяся теплота отводится в окружающую среду стружкой, заготовкой и инструментом. Однако распределяется оно неравномерно и зависит от условий обработки. Стружкой отводится 25...85 %, заготовкой – 10...50 %, инструментом – 2...8 % и около 1 % рассеивается в окружающую среду. С увеличением скорости резания доля тепла, отводимого стружкой, увеличивается. С увеличением температуры в зоне резания снижается стойкость инструмента, понижается точность обработки. Для снижения тепловой нагрузки в зоне обработки широко используют смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ).

### **6.3. Инструментальные материалы**

Режущие инструменты работают в условиях действия значительных силовых нагрузок, термических воздействий, трения и износа. Поэтому материал режущей части инструмента должен иметь высокие твердость и предел прочности при изгибе, растяжении, сжатии и кручении. В то же время материал должен иметь достаточную вязкость, чтобы сопротивляться динамическим нагрузкам, особенно при обработке заготовок с прерывистой обрабатываемой поверхностью. Иметь достаточную теплостойкость, чтобы не терять своих режущих свойств при температурах, возникающих в зоне резания, и износостойкость. Основные типы инструментальных материалов приведены на рисунке 5.9.

**Углеродистые инструментальные стали** содержат 0,7...1,3 % углерода и обозначаются буквой У, за которой следуют одна или две цифры, указывающие содержание углерода в десятых долях процента. Например, У7, У10, У13. В высококачественных сталях, содержащих вредных примесей (серы и фосфора) не более 0,025 %, в конце марки добавляется буква А, например, У7А, У13А. Эти стали относятся к классу не теплостойких и позволяют производить обработку



заготовок при температурах в рабочей зоне не выше 200 °С. Они имеют твердость после закалки и низкого отпуска порядка 57...61 HRC, которая при температурах выше 200 °С снижается, в следствие чего падает режущая способность и стойкость инструмента. Углеродистые инструментальные стали применяют для изготовления режущего инструмента, работающего при невысоких скоростях резания (до 0,2...0,3 м/с), в частности, метчиков, плашек, ножовочных полотен, сверл, зенкеров и других инструментов для ручной обработки.

**Низколегированные инструментальные стали** содержат кроме железа и углерода обычно хром, вольфрам, ванадий, молибден, кремний в количестве до 5 %. Они имеют твердость после термообработки около 59...63 HRC, и теплостойкость до 250 °С. Обладают большей прокаливаемостью, вязкостью, менее склонны к деформации при термообработке и допускают скорости резания до 0,5 м/с. В обозначении марок сталей на первом месте стоит одна цифра, показывающая количество углерода в десятых долях процента, далее указываются буквами легирующие элементы, правее которых указывается их количество в процентах. Если углерода 1 % или более, то цифра в начале марки не ставится. Например, 9ХС, ХВСГ, 7Х3. Легирующие элементы обозначаются следующими буквами: В – W, Г – Mn, Д – Cu, К – Co, М – Mo, Н – Ni, С – Si, Т – Ti, Ф – V, Х – Cr. Применяют стали этого типа для изготовления протяжек, сверл, плашек, метчиков, разверток при температурах режущих кромок не выше 250 °С.

**Теплостойкие быстрорежущие стали** относятся к классу высоколегированных сталей и содержат обычно от 5,5 до 19 % вольфрама, 2...10 % кобальта и ванадия, 1...2 % углерода и другие легирующие элементы. В обозначении быстрорежущих сталей на первом месте стоит буква Р (rapid – быстрый). Основным легирующим элементом в них является вольфрам, поэтому сразу после буквы Р ставится цифра, указывающая количество вольфрама в стали в целых процентах, например, Р18 (18 % вольфрама, около 1 % углерода, остальное – железо). Если имеются и другие легирующие элементы, то далее указываются и они, а справа от буквы количество элемента в процентах. Например, Р6М5 (W – 6 %, Mo – 5 %, C~1 %, Fe – остальное). После термообработки твердость инструмента составляет 62...65 HRC и сохраняется она до температур 600...640 °С.

Стали Р9, Р18, Р6М5 (нормальной теплостойкости) применяют для изготовления инструмента типа резцов, фрез, зенкеров, протяжек, шеверов и др., работающих в условиях черновой обработки. Для ин-



струмента чистовой обработки используют вольфрамо-ванадиевые быстрорежущие стали типа Р9Ф5, Р14Ф4 (развертки, протяжки, сверлы). Для обработки труднообрабатываемых материалов и прерывистого точения применяют кобальтсодержащие стали Р9К5, Р18К5Ф2 и другие.

**Быстрорежущие стали с интерметаллидным упрочнением** обладают теплостойкостью до 700 °С, например, В11М7К23, В3М14К23. В этих сталях углерода содержится до 0,3 %. Упрочнение их происходит при дисперсионном твердении в результате образования интерметаллидов типа (Fe, Co)<sub>7</sub>, (W, Mo)<sub>6</sub>. Применяются также карбидные стали, содержащие от 30 до 70 % карбидной фазы (в основном карбидов титана). Получают их путем смешения порошков быстрорежущих сталей с мелкодисперсными частицами карбида титана с последующим формованием режущих пластин и их термообработки. Твердость пластин после закалки и отпуска составляет 68...70 HRC<sub>3</sub>.

**Металлокерамические твердые сплавы** получают методами порошковой металлургии, путем прессования, а затем спекания при высоких температурах порошковых смесей из карбидов вольфрама, титана, тантала и металлической связки, чаще всего кобальта. Применяется также никель-молибденовая связка.

**По составу и областям применения твердые сплавы подразделяют** на четыре группы: вольфрамокобальтовые (ВК), титано-вольфрамо-кобальтовые (ТК), титано-тантало-вольфрамо-кобальтовые (ТТК) и безвольфрамовые. Сплавы группы ВК применяют для обработки материалов, дающих элементную стружку и стружку надлома (чугуны, цветные металлы, стеклопластики, жаропрочные сплавы на никелевой или титановой основе). Сплавы группы ТК в основном применяют для обработки сталей, образующих сливную стружку. Материалы группы ТТК используют для обработки труднообрабатываемых материалов. Безвольфрамовые сплавы, например, ТН20 (TiC – 69 %, Ni – 15 %, Mo – 16 %) и КНТ16 (TiCN – 74 %, Ni – 19,5 %, Mo – 6,5 %) применяют для чистовой и получистовой обработки углеродистых и легированных сталей. Эти сплавы дешевле вольфрамо-кобальтовых.

С увеличением количества кобальта в твердых сплавах повышается предел прочности при изгибе, но снижается твердость и износостойкость. Увеличение количества карбида титана приводит к возрастанию износостойкости и твердости, но снижается прочность при из-

гибе. К повышению износостойкости и изгибной прочности при незначительном снижении твердости приводит увеличение в составе сплава количества карбида тантала.

### **Синтетические сверхтвердые и керамические материалы**

Применяется большое количество сверхтвердых материалов (СТМ) на основе плотных модификаций нитрида бора. СТМ, полученные на основе фазового превращения графитоподобного нитрида бора в кубический (эльбор, белбор) применяют для тонкого и чистового точения в условиях безударной нагрузки и торцевого фрезерования закаленных сталей и чугунов любой твердости, твердых сплавов.

СТМ на основе превращения вюрцитного нитрида бора (BN) в кубический (гексанит-Р, 09-ПТНБ – поликристалл твердого нитрида бора) используют для предварительного и окончательного точения и фрезерования сталей, чугунов любой твердости при безударных и ударных нагрузках.

СТМ киборит и ниборит, получаемые путем спекания частиц КНБ, используются для чернового и чистового точения и фрезерования закаленных деталей из чугунов любой твердости. Теплостойкость этих материалов до 1300°C.

Выпускается несколько групп режущей керамики: оксидная (белая) на основе  $Al_2O_3$  (ЦМ332), оксидокарбидная (черная) на основе  $Al_2O_3 - TiC$  (ВОК-63), оксидонитридная на основе  $Al_2O_3 - TiN$  (ОНТ-20), нитридная на основе  $Si_3N_4$  (РК-30). Из режущей керамики изготавливают элементы простой формы и применяют их для чистовой обработки чугунов, сталей, цветных металлов. Материалы хрупки и при прерывистой обработке неприменимы.

## **6.4 Металлорежущие станки**

### **Классификация станков и обозначение**

В основу классификации металлорежущих станков положен технологический метод обработки заготовок. В соответствии с такими признаками как вид режущего инструмента, характер обрабатываемых поверхностей и схемы обработки станки делят на: токарные, сверлильные, шлифовальные, полировальные и доводочные зубооб-

рабатывающие, фрезерные, строгальные, разрезные, протяжные, резьбообрабатывающие и т.д.

**Единая система условных обозначений** построена на десятичной системе – *все станки разделены на десять групп, группа – на десять типов, а тип – на десять типоразмеров*. В группу объединены станки по общности технологического метода обработки или близкие по назначению.

Каждому станку присваивается определенный шифр. Первая цифра определяет группу станков, вторая – тип, третья (иногда и четвертая) показывают условный размер станка.

Буква на втором или третьем месте позволяет различать станки одного типоразмера, но с разными техническими характеристиками. Буква в конце шифра указывает на различные модификации станков одной базовой модели. Например, шифр 2Н135 обозначает вертикально-сверлильный станок (группа 2, тип 1), модернизированный с наибольшим диаметром сверления 35 мм. Буква Ф в конце шифра указывает, что станок имеет числовое программное управление, а цифра и буква за ней обозначают систему ЧПУ используемую в станке. Например, 16К20Ф3С32 – 1 – станок токарной группы, 6 – винторезный, К – модифицированный, 20 – высота центров над направляющими 200 мм, Ф – станок с ЧПУ, 3 – управление по трем координатам, С32 – система ЧПУ.

Различают станки *универсальные, широкого применения, специализированные и специальные*. **На универсальных станках** выполняют самые разнообразные работы, используя заготовки разных наименований – токарно-винторезные, горизонтально-фрезерные и др. **Станки широкого назначения** – для выполнения определенных работ на заготовках многих наименований (многорезцовые, токарно-отрезные). **Специализированные** – предназначенные для обработки заготовок одного наименования, но разных размеров (станки для обработки коленчатых валов). **Специальные станки** – для определенного вида работ на одной определенной заготовке.

**По степени автоматизации** различают станки с ручным управлением, полуавтоматы, станки с программным управлением.

**На неавтоматизированных станках** часть подвижных узлов снабжена механизированными приводами, часть применяется вручную. Управление станком при выполнении технологических операций осуществляет рабочий.

На полуавтоматических станках все движения выполняются с помощью соответствующих приводов по специальной программе. Рабочий только устанавливает и снимает заготовки и включает станок на следующий технологический цикл.

*Автоматические станки* выполняют весь технологический цикл, включая установку и съем заготовки, а также повторный запуск станка автоматически.

Автоматические станки, расположенные в определенной последовательности и связанные между собой автоматической транспортировкой заготовки образуют *автоматические линии*.

*Гибкие производственные модули (ГМП)* имеют в своем составе станок с ЧПУ, инструментальный магазин, манипулятор для переустановки инструмента, диагностическое устройство для оценки пригодности инструмента к работе, робот для установки и снятия заготовки. ГМП способны производить собственную переналадку.

ГМП, совмещенные с автоматическим транспортом заготовок, автоматическими складами заготовок и деталей, образуют *гибкие производственные системы (ГПС)*.

*По числу главных рабочих органов* станки делят на одно – и многошпиндельные, одно- и многосуппортные.

*В классификации по точности* установлены 5 классов точности станков: Н – нормальной, П – повышенной, В – высокой, А – особо высокой точности, С – особо точные станки.

*Металлообрабатывающие станки* представляют собой сложные технические устройства, в состав которых входят: базовые детали, исполнительные узлы, привод и системы управления, энергоснабжения, смазки, охлаждения, освещения диагностики инструмента, контрольно-измерительной аппаратуры, защитные устройства.

*Базовые детали* – станина, стойки, колонны, кронштейны и др., на которых монтируются все узлы и системы. Выполненные на базовых деталях направляющие обеспечивают взаимное перемещение исполнительных узлов, во многом обеспечивают точность формы и размеров обрабатываемой детали. Для гашения вибраций станка, возникающих при работе, они обычно делаются массивными.

*К исполнительным узлам* относятся шпиндели, шпиндельные головки, стол, суппорт, поперечные салазки, консоль, силовая головка. Они несут на себе заготовку либо инструмент, совершают рабочие движения, а также вспомогательные движения во время наладки станка.

*Шпиндель* – точный вал, на конце которого закрепляют заготовку (у станков токарной группы) или инструмент (у сверлильных, фрезерных, расточных, шлифовальных и др.). Шпиндельная головка – это узел, включающий шпиндель и его привод.

*Столы станков* предназначены для крепления на них заготовок, вместе с которыми в большинстве станков совершают движение подачи.

*Суппорт* – устройство, на котором расположен резцедержатель или револьверная головка с закрепленными на них инструментами. Суппорт обеспечивает движение подачи инструмента в процессе резания и перемещение его при наладке.

*Привод* – это совокупность устройств и механизмов, обеспечивающих перемещение рабочих органов. На станках может быть один привод или несколько. На станках с ЧПУ обычно на каждый рабочий орган предусматривается свой привод.

*Система управления станком* включает механизмы, обеспечивающие ручную или в автоматическом режиме переключение механизмов для выполнения технологических и установочных операций.

*Система смазки* включает бак с минеральным маслом, маслопроводы, фильтры и обеспечивает смазку всех трущихся поверхностей станка, снижение его износа и уменьшение энергетических потерь на трение.

*Система охлаждения* предназначена для снижения тепловой напряженности в зоне резания и включает бак с СОЖ, насос с приводом, трубопроводы для подвода СОЖ в зону резания, фильтры, отстойники для отделения механических частиц.

*Система освещения* автономными светильниками предусматривается для лучшего обзора рабочей зоны.

*Контрольные и диагностирующие устройства* включают приборы активного контроля пространственного положения движущихся узлов и размеров, датчики износа и целостности инструмента и др.

*Защитные устройства* станка предназначены для защиты обслуживающего персонала от повреждений, связанных с работой механизмов станка, образованием стружки, воздействием СОЖ и др. На станках предусматривают кожухи, экраны, вытяжки и др. устройства.

Совокупность механизмов, передающих движение от его источника к рабочим органам называется *приводом*. В металлорежущих станках используют индивидуальные приводы. Каждый станок приводится в движение от одного или нескольких электродвигателей.

В последнем случае различают приводы главного движения, подачи и вспомогательных движений.

Для передачи движения от электродвигателя к ведущему валу рабочего узла используют ременные, цепные или зубчатые передачи. Приводы станков бывают со ступенчатым и бесступенчатым регулированием частоты вращения и величины подач в определенных пределах. Механизмы бесступенчатого регулирования скорости бывают электрические, гидравлические и механические. Реверсирование - изменение направления вращения всего привода осуществляется переключением фаз асинхронного электродвигателя или полярности электродвигателя постоянного тока. Реверсирование гидравлических механизмов осуществляется гидрораспределителями. В механизмах с зубчатыми передачами - путем переключения вправо или влево кулачковых муфт.

### **6.5. Обработка заготовок на станках токарной группы**

*Станки токарной группы* предназначены для обработки вращающихся заготовок инструментом, совершающим непрерывное движение подачи. *Главным движением*, определяющим скорость резания, является вращательное движение заготовки. Основным режущим инструментом служит резец, но применяют также сверла, развертки, зенкеры и др. инструменты. *Движения подачи* могут быть параллельными оси вращения заготовки  $S_{пр}$ , перпендикулярно ей  $S_{п}$  и под углом  $S_{н}$ . На вертикальных автоматах, полуавтоматах и токарно-карусельных станках заготовки имеют вертикальную ось вращения, на остальных – горизонтальную. В машиностроении станки этой группы составляют 30...40% от общего станочного парка.

На станках токарной группы можно выполнять обтачивание, растачивание, подрезание и резку заготовок. *Под обтачиванием* понимается обработка наружных поверхностей заготовок, *растачиванием* – внутренних. *При подрезании* обрабатываются плоские торцовые поверхности. *Резкой* называется разделение заготовок на части или отрезка готовой детали от заготовки.

## Типы станков токарной группы

*По технологическому назначению* станки токарной группы делятся на: токарно–винторезные, токарно–револьверные, карусельные, многорезцовые одно- и много-шпиндельные автоматы и др.

*По способу управления* станки подразделяют на: станки с ручным управлением (универсальные), полуавтоматы и автоматы, с системами ЧПУ.

*Токарно-винторезные* станки предназначены для выполнения всех основных видов токарных работ в условиях единичного и мелкосерийного производства. В крупносерийно и массовом производстве используют токарные полуавтоматы и автоматы.

*Токарно-револьверные* станки используют в серийном производстве при обработке сложных деталей с отверстиями. Револьверные головки позволяют значительно сократить время на смену инструмента.

*Токарно-карусельные* станки предназначены для обработки крупных тяжелых заготовок, у которых высота составляет 0,3...0,5 от диаметра.

*Многорезцовые и многошпиндельные* станки применяют в условиях крупносерийного и массового производства для изготовления деталей, на которых возможна одновременная обработка резцами нескольких поверхностей.

*Станки с ЧПУ* используют в автоматизированных производствах. Станки оборудуются 4...12 позиционными револьверными головками.

## Режущий инструмент и технологическая оснастка токарных станков

### Токарные резцы

*По технологическому назначению* различают резцы: проходные 1-3 для обтачивания наружных цилиндрических и конических поверхностей; подрезные 4 для обтачивания плоских торцовых поверхностей; расточные 5 и 6 для растачивания сквозных (проходные) и глухих (упорные) отверстий; отрезные 7 для разрезания заготовок и протачивания тонких кольцевых надставок; резьбовые для нарезания

наружных 8 и внутренних резьб; фасонные стержневые 9, круглые и призматические для обтачивания фасонных поверхностей (рис. 6.7).

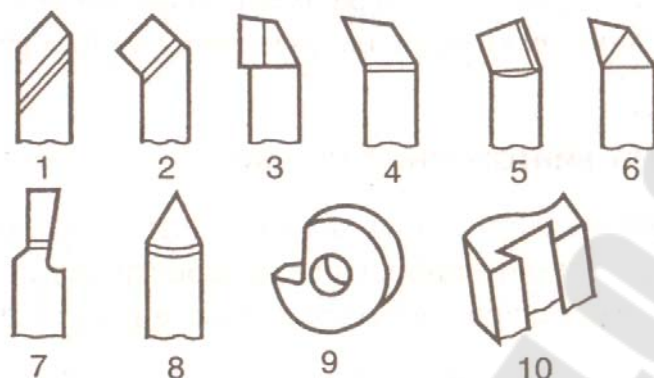


Рис. 6.7. Основные типы токарных резцов

**По форме рабочей части** резцы делят на: прямые 1, отогнутые 2, оттянутые 3.

**По направлению подачи** резцы подразделяют на правые, работающие с подачей справа налево, и левые – слева направо.

**По способу изготовления** различают резцы цельные, с приварной встык рабочей частью, с припаянными пластинами, со сменными режущими пластинками.

**По характеру обработки** резцы делят на черновые, получистовые и чистовые.

### Приспособления для закрепления заготовок

Система закрепления заготовок на станке зависит от типа станка, вида обрабатываемой поверхности и ее геометрических размеров. Наиболее широко используются **трехкулачковые самоцентрирующиеся патроны** (рис. 6.8). Их применяют для закрепления заготовок, длина которых ( $l$ ) не превышает 4 ее диаметров ( $d$ ).

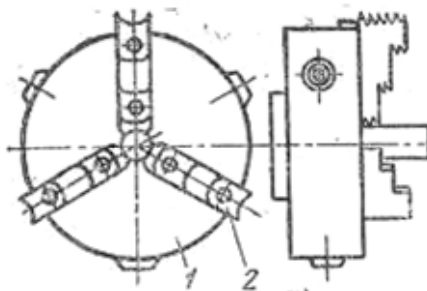


Рис. 6.8. Схема трехкулачкового самоцентрирующегося патрона



При отношении  $l/d$  от 4 до 10 заготовку устанавливают **в центрах**, а для передачи на нее крутящего момента от шпинделя станка применяют **поводковые устройства**. С торцов заготовки выполняют специальными центровочными сверлами центровые отверстия. Используют центры упорные (конические) (а), шариковые (б), срезаемые (в), обратные (г) (рис. 6.9). При срезе больших сечений стружки и на высоких скоростях резания применяют вращающиеся центры.

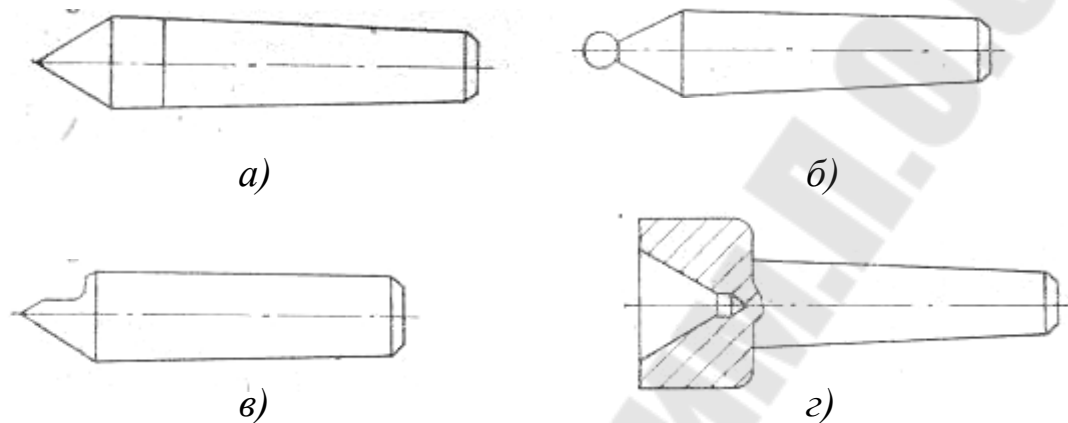


Рис. 6.9. Виды центров

При отношении  $l/d > 10$  для уменьшения деформации заготовки от сил резания применяют **люнеты** (рис. 6.10). Подвижный люнет (а) устанавливают на суппорте станка, а неподвижный (б) – на станине.

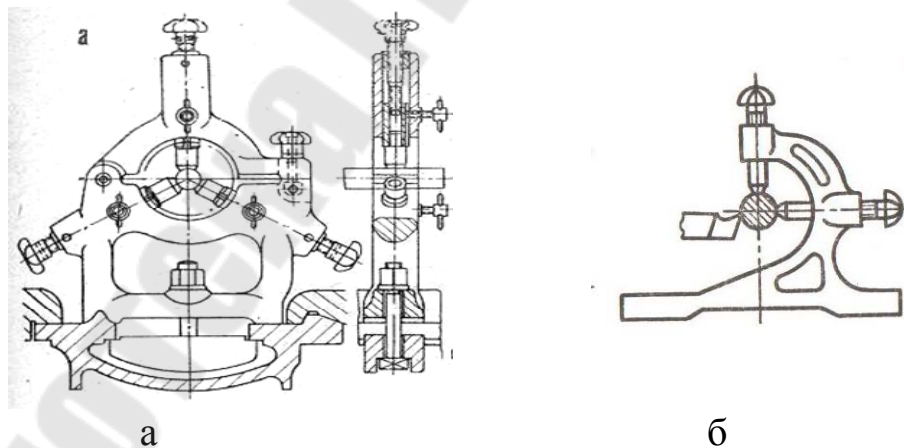


Рис. 6.10. Схема подвижного (а) и неподвижного (б) люнета

Для повышения производительности обработки на станках применяют **револьверные головки**, устанавливаемые на станине или на суппорте (в токарно-револьверных станках), в которых помещается одновременно 6– различных инструментов (рис. 6.11).

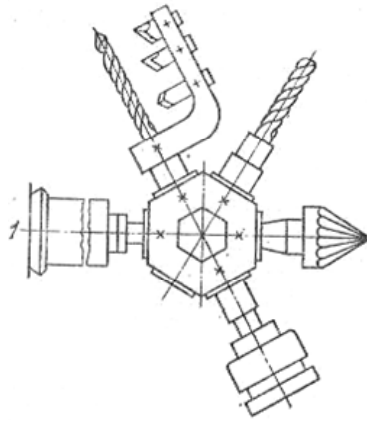


Рис. 6.11. Схема револьверной головки

**Токарно-винторезный станок** (рис. 6.12) получил наибольшее распространение из-за широких технологических возможностей. Все узлы станка смонтированы на станине 8 коробчатой формы с горизонтальными призматическими направляющими, закрепленной на двух тумбах. В передней тумбе смонтирован электродвигатель главного привода станка, а в задней – насосная станция и бак для СОЖ.

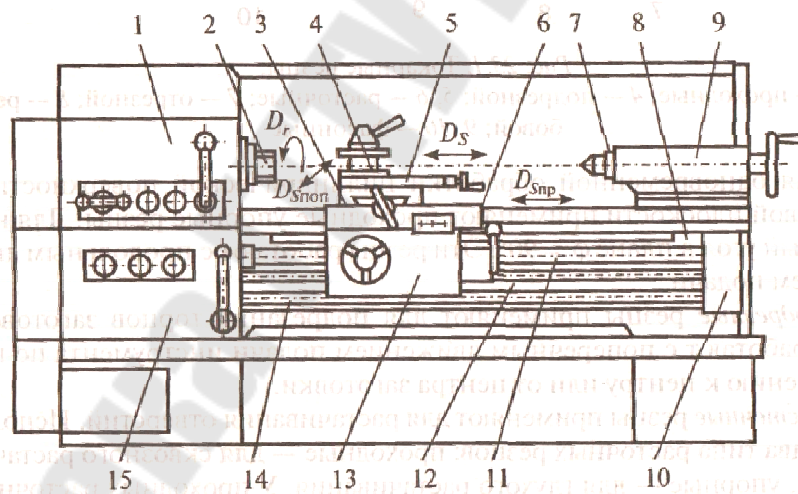


Рис. 6.12. Общий вид токарно-винторезного станка 16К20

В левой бабке 1 смонтированы коробка скоростей, шпиндель 2, на котором крепят зажимные приспособления для передачи вращения обрабатываемой детали. На лицевой стороне находится панель управления механизмом коробки скоростей. Ниже находится коробка подачи. Слева крепится коробка сменных зубчатых колес, необходимых для наладки при нарезании резьбы.

По направляющим передвигается продольный суппорт 6, обеспечивающий продольную подачу. По направляющим этого суппорта

перемещается поперечная каретка 3, на которой смонтирован верхний суппорт 5. Поперечная каретка обеспечивает поперечную подачу. Верхний суппорт поворотный обеспечивает наклонную подачу, что необходимо при обработке конических поверхностей. На верхнем суппорте смонтирован четырехпозиционный резцедержатель 4. К продольному суппорту прикреплен фартук 13 с механизмом для преобразования вращательного движения ходового валика 12 или винта 11 в поступательное. Задняя бабка 9 подвижная. В пиноли задней бабки устанавливают задний центр 7 или инструмент для обработки отверстий (сверло, зенкер, развертку). На рисунке 6.13 приведены *основные операции выполняемые на токарно-винторезном станке*.

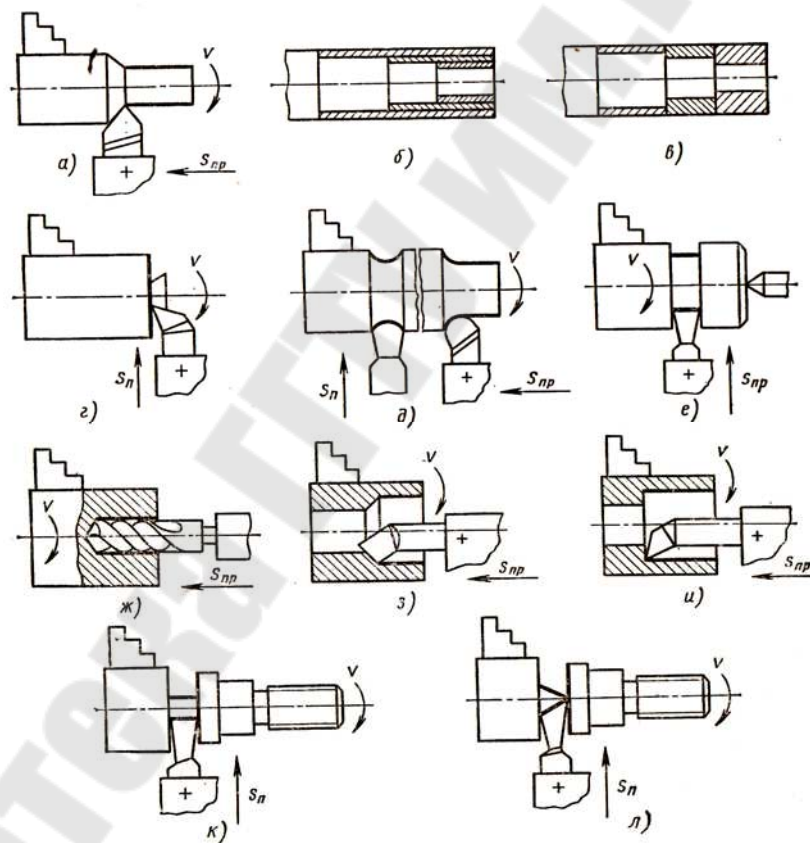


Рис.6.13. Схемы обработки заготовок на токарно-винторезном станке

*Обтачивание цилиндрических поверхностей* выполняют прямыми, отогнутыми или упорными проходными резцами (рис. 6.13а).

Ступенчатые валы обтачивают по схемам деления припуска на части. Обработку начинают с поверхностей с меньшим припуском (рис. 6.13б, в).

*Подрезание торцов* выполняют подрезными резцами до обтачивания поверхностей с поперечной подачей (рис. 6.13г).

*Обтачивание скруглений* между ступенями валов выполняют специальными проходными резцами с закруглениями (рис. 6.13д).

*Протачивание канавок* выполняют подрезными резцами, у которых длина главной режущей кромки равна ширине канавки (рис. 6.13е).

*Сверление, зенкерование и развертывание отверстий* выполняют соответствующим инструментом, закрепляемым в задней бабке (рис. 6.13ж).

*Растачивание внутренних цилиндрических поверхностей* выполняют расточными резцами, гладких сквозных – проходными (рис. 6.13з), а глухих – упорными расточными резцами (рис. 6.13и).

*Отрезку обработанных деталей* выполняют отрезными резцами с поперечной подачей (рис. 6.13к, л).

*Обтачивание конических поверхностей* производят одним из следующих способов (рис. 6.14).

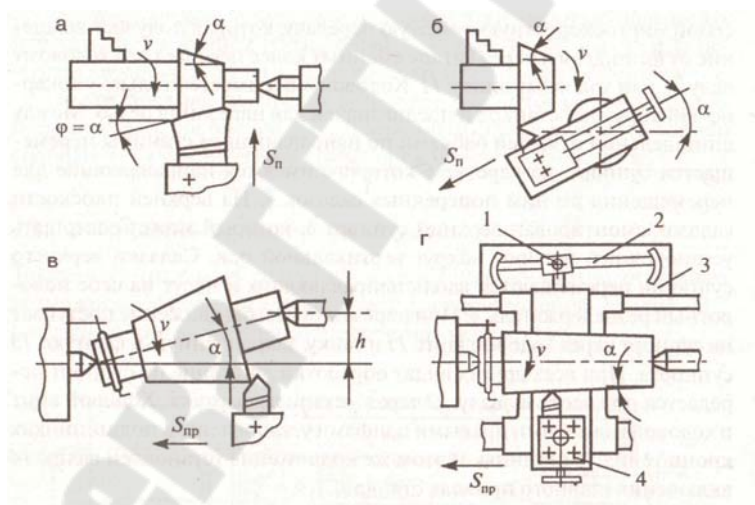


Рис. 6.14. Схемы обработки конических поверхностей на токарно-винторезном станке

При длине образующей до 30 мм – проходным резцом с главным углом в плане равным половине угла при вершине конуса (рис. 6.14а).

При обточке конических поверхностей с длиной образующей, не превышающей величину хода каретки верхнего суппорта, путем поворота каретки верхнего суппорта на половину угла при вершине ко-

нуса (рис. 6.14б). Ручная подача осуществляется под углом к линии центров станка.

Длинные конические поверхности с небольшими углами ( $2\alpha < 8^\circ$ ) обтачивают со смещением корпуса задней бабки в поперечном направлении (рис. 6.14в). Заготовки устанавливаются в шариковых центрах. Ось заготовки располагается под углом к линии центров станка, а коническая поверхность, образующаяся при обработке, параллельна линии центров станка.

Длинные конические поверхности с углом при вершине  $30...40^\circ$  обтачивают с помощью конусной линейки (рис. 6.14г). Корпус линейки 3, на котором имеется призматическая направляющая 2, крепится на станине станка. По направляющей перемещается ползун 1, связанный посредством рычага с кареткой поперечного стола 4. Необходимая конусность устанавливается путем поворота направляющей линейки на нужный угол к линии центров.

*Обтачивание фасонных поверхностей* с длиной образующей до 40 мм производят с помощью фасонных резцов. С большей протяженностью – с помощью фасонного копира, устанавливаемого вместо конусной линейки. Применяют также специальные гидроконтрольные суппорты.

*Нарезание резьбы* производят резцами, метчиками и плашками.

**Токарно-револьверные станки** имеют специальную револьверную головку, в которой крепится инструмент (рис. 6.11).

*По конструкции головки* различают станки: с многогранной головкой и вертикальной осью вращения головки; с круглой головкой, вращающейся вокруг горизонтальной оси; с наклонной осью головки.

*На этих станках выполняют те же операции, что и на токарном станке.* Во время наладки в резцедержатель и револьверную головку крепят весь необходимый инструмент, который вводится в процессе обработки последовательно ими или параллельно.

**На токарно-карусельных станках** (рис. 6.15) обрабатывают тяжелые заготовки больших размеров, у которых отношение  $l/d \sim 0,3...0,5$  (маховики, роторы турбин, большие зубчатые колеса и др.). *Отличительная особенность их* – наличие круглого горизонтального стола (карусели) с вертикальной осью вращения. Диаметр карусели составляет 0,5...21 м. Имеются одно- и двухстоечные станки.



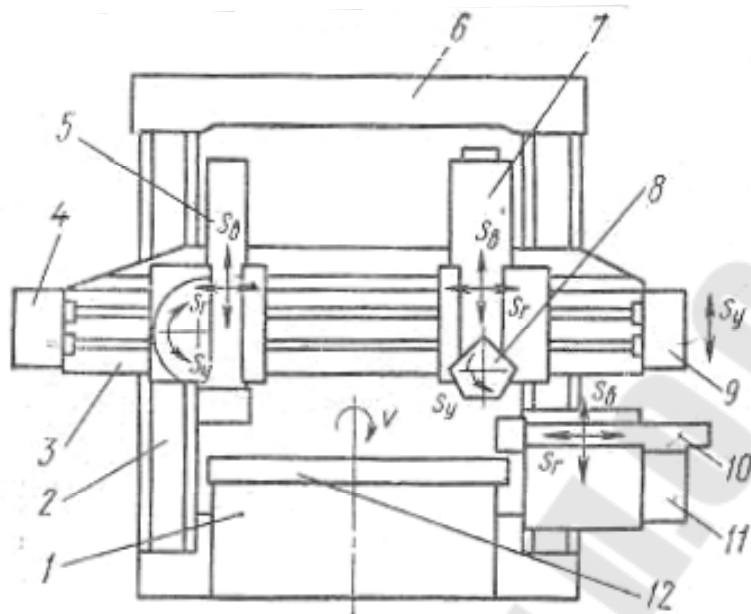


Рис. 6.15. Схема двухстоечного токарно-карусельного станка:  
 1 – станина; 2 – стойки; 3 – подвижная траверса; 4 – коробка передач; 5 – верхний суппорт; 6 – поперечина; 7 – револьверный суппорт; 8 – револьверная головка; 9 и 11 – коробки подач;  
 10 – боковой суппорт; 12 – карусель

На **многолезцовых токарных полуавтоматах** обрабатывают заготовки деталей типа ступенчатых валов. Станки имеют два суппорта: один с продольной подачей, а второй – с поперечной. Обработка производится одновременно несколькими инструментами. Обрабатываются только наружные поверхности.

**Токарные автоматы** выпускаются одно- и многошпиндельные. Одношпиндельные бывают фасонно-отрезные, продольно-фасонные и токарно-револьверные. *Фасонно-отрезные* предназначены для обработки деталей простой формы, небольшого диаметра и малой длины из прутков. Автоматы имеют до 4 суппортов передний, задний, наклонные, на которых крепят фасонные резцы. На этих автоматах обрабатывают только наружные поверхности. *Продольно-фасонные автоматы* предназначены для обработки деталей сложной формы диаметром до 22 мм и длиной до  $20d$  из калиброванных прутков с использованием люнеты. Станки имеют до 6 суппортов с поперечной подачей, в которых крепятся проходные резцы. Сочетание продольной подачи прутка с поперечной подачей резцов позволяет обрабатывать наружные цилиндрические, конические, фасонные поверхности, протачивать канавки. Дополнительный продольный суппорт позволяет выполнять сверлильные и резьбонарезные работы. *Токарно-*

*револьверные автоматы* имеют револьверный суппорт с револьверной головкой, работающей с продольной подачей, и до 4 поперечных суппортов. На этих станках обрабатывают наружные поверхности различной формы, отверстия сверлением, зенкерованием, растачиванием, нарезание резьбы, накатку рифлений.

*Многошпиндельные автоматы* предназначены для изготовления изделий из прутка или штучных заготовок (поковок, отливок), которые закладываются в магазины.

*Автоматы параллельной обработки* предназначены для одновременного изготовления нескольких однотипных деталей. Обрабатывают только наружные поверхности заготовок и только с поперечной подачей резца.

*Автоматы последовательной обработки* имеют в передней стойке цилиндрический барабан. На торцовой стороне передней стойки у каждого шпинделя установлены поперечные суппорты. Между стойками расположен осевой суппорт с каретками, имеющими продольное перемещение. Инструменты работают одновременно и после каждой операции шпиндельный барабан поворачивает деталь в следующую позицию.

*Вертикальный многошпиндельный автомат роторной обработки* имеет карусель, в которой смонтированы шпиндели. На центральной колонне закреплены вертикальные суппорты. Карусель вместе со шпинделем медленно вращается, такую же скорость вращения имеет и колонна с суппортами. За один оборот карусели и колонны обработка заканчивается.

### **Технологические требования к конструкциям обрабатываемых деталей**

Детали должны содержать большинство поверхностей, имеющих форму тел вращения.

Масса детали должна быть уравновешена относительно оси детали.

Необходимо использовать нормальный ряд диаметров и длин, что обеспечивает применение стандартных режущих и измерительных инструментов.

Избегать применения нежестких втулок и валов.

Радиусы сопряжения ступенчатых валов желательно делать одного размера, чтобы обрабатывать одним резцом.

Необходимо в конструкции детали предусматривать свободный вход и выход инструмента, если нужно делать технологические канавки.

Избегать резких перепадов размеров в ступенчатых валах. При необходимости напрессовывать втулки.

Избегать сложных фасонных поверхностей, особенно внутренних. Целесообразно применение вставок.

Ступенчатые отверстия делать последовательно от большего к меньшему.

В торцах валов, обрабатываемых в центрах, предусматривать центровые отверстия.

Избегать в конструкции обрабатываемой детали ребристых поверхностей.

## **6.6. Обработка заготовок на станках сверлильно-расточной группы**

**Сверление** – наиболее распространенный метод получения отверстий в сплошном материале. Сверление осуществляют при сочетании вращательного движения инструментом вокруг своей оси (главное движение резания) и поступательного его движения вдоль оси (движение подачи). Оба движения на сверлильном станке сообщают инструменту, заготовка крепится неподвижно на столе. При сверлении на токарном станке главное движение (вращательное) совершает заготовка, а сверло совершает лишь поступательное движение подачи.

Процесс резания при сверлении протекает в более сложных условиях, чем при точении, так как затруднен отвод стружки из зоны резания и подвод в нее СОЖ.

**В зависимости от назначения сверла по конструкции подразделяются** на: спиральные, правые, центровочные, сверла для глубокого сверления и др. Наиболее широко используются спиральные сверла. Изготавливают сверла для сверления отверстий от 0,1 до 80 мм.

**Спиральное сверло** (рис. 6.16) состоит из рабочей части 6, шейки 2, хвостовика 4 и лапки 3. Сверла малого диаметра изготавливают с цилиндрическим, а большего – с коническим хвостовиком. На рабочей части различают режущую 1 и направляющую 5 части с винтовыми канавками. Шейка 2 соединяет рабочую часть сверла с хвостовиком и служит для вывода шлифовального круга при обработке хво-



стовика и направляющих ленточек. Хвостовик служит для закрепления сверла в шпинделе станка, а лапка – упором при выбивании его из шпинделя.

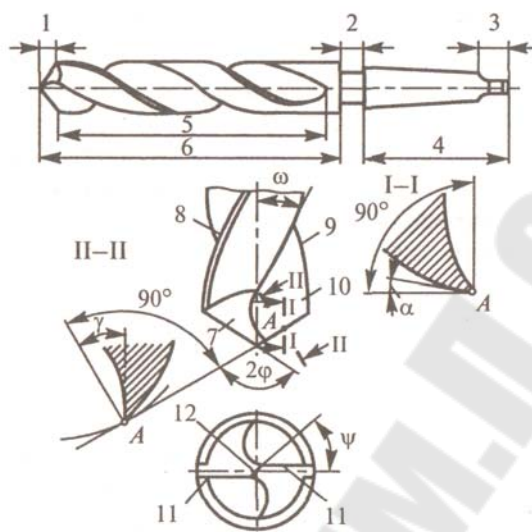


Рис. 6.16. Спиральное сверло

Сверло имеет две главные режущие кромки, образованные пересечением передних и задних поверхностей лезвия и выполняющие основную работу резания. Поперечную режущую кромку 12 и две вспомогательные режущие кромки 9, улучшающие качество обработанной поверхности. Этими кромками являются винтовые кромки направляющих ленточек 8. Поперечная режущая кромка сама не режет, но способствует выведению стружки из зоны резания.

При сверлении отверстий длиной более пяти диаметров сверла (при диаметре 30...80 мм) необходимо применять специальные сверла с улучшенными условиями отвода стружки, теплоты и подвода СОЖ. Отверстия диаметром более 100 мм сверлят специальными кольцевыми сверлами.

Режущие инструменты в зависимости от размеров и формы хвостовика крепятся различными способами. Инструменты с коническим хвостовиком, размеры которых совпадают с размерами конического гнезда шпинделя, крепятся непосредственно в шпинделе. Если размеры хвостовика меньше, применяют переходные конусные втулки. Инструменты с цилиндрическим хвостовиком (диаметром менее 12 мм) крепятся в цанговых патронах (рис. 6.17).

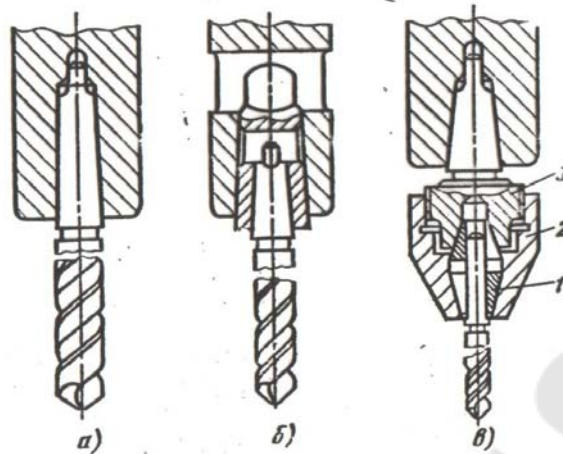


Рис. 6.17. Схемы крепления режущего инструмента на сверлильных станках

На сверлильных станках выполняют следующие операции: сверление, зенкерование, развертывание, нарезание резьб, цекование (рис. 6.18).

Сверлением обрабатываются сквозные и глухие отверстия диаметром до 80 мм (рис. 6.18 а). При изготовлении точных отверстий эта операция является предварительной. Отверстия большего диаметра получают путем *рассверливания* (рис. 6.18 б), при этом диаметр отверстия под рассверливание выбирают так, чтобы поперечная режущая кромка сверла в работе не участвовала. Для повышения точности отверстия применяется зенкерование и развертывание отверстий.

*Зенкерование* производят для увеличения диаметров уже существующих цилиндрических отверстий в целях повышения их точности и качества поверхности (рис. 6.18в), а также для получения отверстий заданного профиля (рис. 6.18 м, н). *Припуски под зенкерование* составляют 0,5...2 мм на сторону, а для литых и кованных заготовок могут достигать до 7 мм. *Зенкеры* позволяют получать отверстия с точностью по 12...10 качеству при шероховатости поверхности  $R_a = 25...3,2$  мкм. В отличие от сверла зенкеры не имеют поперечной режущей кромки, имеют 3...4 главных режущих кромки и коническую направляющую часть. Зенкерование может быть окончательной операцией или получистовой перед развертыванием.

*Развертывание* – окончательная обработка отверстия с целью повышения точности и качества поверхности (рис. 6.18г, о). Оно позволяет получить 10...6 качество точности отверстия при шероховатости поверхности  $R_a = 12,5...0,4$  мкм. Припуск на обработку составляет 0,25...0,05 мм на сторону.

Конструкция развертки аналогична зенкеру, так же имеет коническую направляющую часть и является многолезвийным инструментом. Однако развертки имеют 6...12 зубьев (четное число для удобства измерения диаметра), направленных в большинстве случаев вдоль оси инструмента. По способу применения они подразделяются на машинные и ручные (применяемые слесарями), по форме обрабатываемых отверстий – на цилиндрические и конические. Конические отверстия получают путем обработки отверстия ступенчатым зенкером, а затем конической разверткой (рис. 6.18 м, н, о).

Цекованием называется операция обработки, обеспечивающая перпендикулярность торцевой поверхности отверстия его оси (бобышек) (рис. 6.18 ж, з). Инструмент для обработки бобышек называют цековкой.

Зенкованием создаются конические или цилиндрические углубления в отверстиях для размещения головок крепежных деталей (рис. 6.18д).

Метчики применяют для нарезания внутренней резьбы (рис. 6.18 к). Метчик представляет собой винт с прорезанными прямыми или винтовыми канавками, образующими режущие кромки. Рабочая часть метчика имеет режущую и калибрующую части. Профиль резьбы метчика должен соответствовать профилю нарезаемой резьбы.

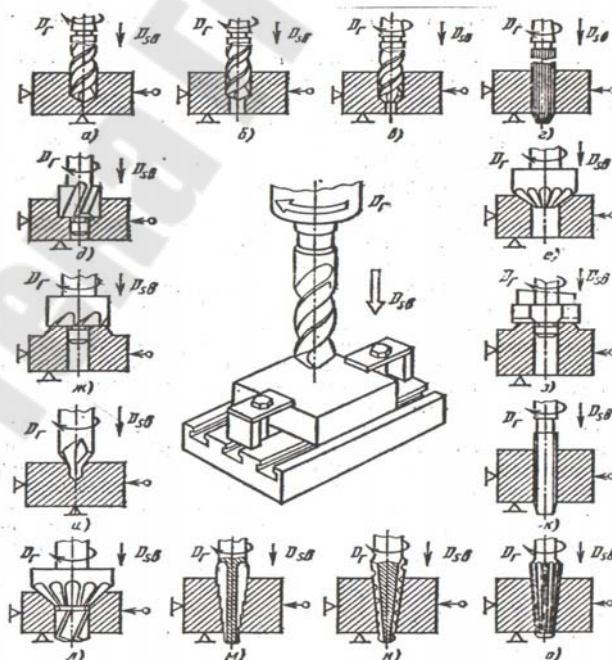


Рис. 6.18. Основные виды обработок, выполняемых на сверлильных станках

## Крепление заготовок на столе станка

Заготовки на столе крепятся прижимными планками или в машинных тисках. При обработке отверстия под углом к установочной плоскости используют специальные угольники и различные приспособления. Заготовки, имеющие цилиндрические части, крепят в трехкулачковых патронах, устанавливаемых на столе станка. При сверлении отверстий на цилиндрических деталях их устанавливают на призме и закрепляют струбциной. Для сверления нескольких точно расположенных отверстий в заготовках, обрабатываемых партиями, применяют кондукторы с направляющими втулками. При этом отпадает необходимость в разметке деталей.

## Типы сверлильных станков

Существуют следующие *типы сверлильных станков*: настольно-сверлильные, вертикально-сверлильные, радиально-сверлильные, горизонтально-сверлильные (рис. 6.19). *Настольно-сверлильные станки* выпускают для сверления отверстий диаметром до 16 мм. *Вертикально- и радиально-сверлильные* – для сверления отверстий диаметром до 100 мм. *Горизонтально-сверлильные станки* предназначены для сверления глубоких отверстий специальными сверлами.

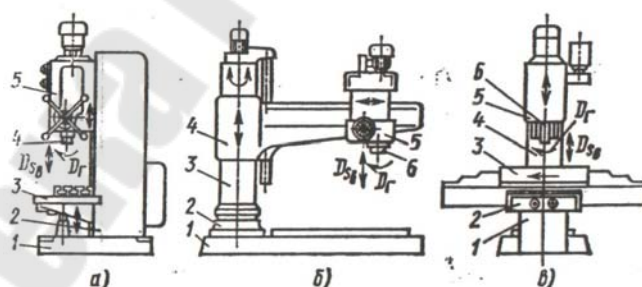


Рис. 6.19. Основные типы сверлильных станков:

- а – вертикально-сверлильный; б – радиально-сверлильный;  
в – универсальный

*На вертикально-сверлильных станках* (рис. 6.19) обрабатывают заготовки массой до 25 кг, которые крепят непосредственно на столе 3 или в машинных тисках. Стол имеет вертикальное установочное перемещение по направляющим колонны 2, смонтированной на фундаментной плите 1. Режущий инструмент, закрепленный в шпинделе 4,

получает главное вращательное движение от коробки скоростей, а движение подачи – от коробки подач 5, смонтированной в кронштейне, укрепленном на колонне. Кронштейн имеет также установочное вертикальное перемещение. На этих станках оси обрабатываемого отверстия и инструмента совмещаются за счет перемещения заготовки.

**В радиально-сверлильных** станках на фундаментной плите 1 крепится колонна с поворотной гильзой 3, по которой перемещается в вертикальном направлении траверса 4. По горизонтальным направляющим траверсы перемещается шпиндельная головка 5, в которой расположены коробка скоростей и коробка подач. Заготовка крепится на столе или, при обработке крупногабаритных изделий, непосредственно на фундаментной плите. Инструмент крепится в шпинделе 6. Совмещение оси инструмента и обрабатываемого отверстия производится перемещением шпиндельной головки вдоль траверсы, которая может поворачиваться вокруг оси колонны. Траверса может перемещаться вдоль оси колонны и закрепляться на ней.

**В универсальных радиально-сверлильных** станках для сверления отверстий под углом траверса и шпиндельная головка имеют возможность поворачиваться.

Для обработки заготовок с большим числом отверстий используют **вертикально-сверлильные станки с ЧПУ**. На основании станка установлена колонна, по вертикальным направляющим которой перемещается суппорт с револьверной головкой, обеспечивая движение подачи по оси Z. Крестовый стол, состоящий из салазок и стола, имеет возможность перемещаться по двум координатам X и Y с высокой точностью, что позволяет сверлить отверстия без предварительной разметки. Для одновременной обработки нескольких отверстий используют многошпиндельные станки.

**В расточных станках**, как и в сверлильных, обработка отверстий осуществляется за счет сочетания главного вращательного движения инструмента с поступательным движением инструмента или заготовки. Направление подачи в зависимости от вида обрабатываемых поверхностей может быть продольным или радиальным. На расточных станках выполняются в основном растачивание отверстий специальными расточными резцами или блоками. Можно также производить те же операции, что и на сверлильном станке (рис. 6.20). Расточные станки применяют для обработки отверстий в крупных и средних заготовках корпусных деталей с точно координированными осями.



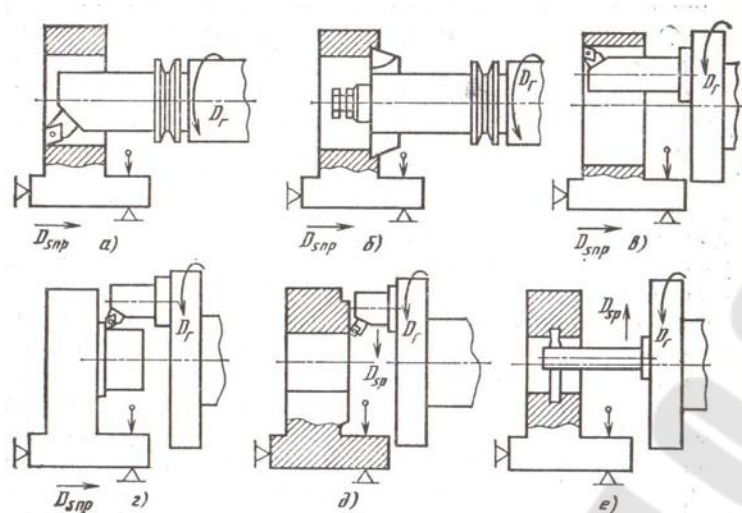


Рис. 6.20. Схемы обработки поверхностей на расточных станках: а – растачивание отверстий; б – подрезание торцов; в – растачивание отверстий очень большого диаметра; г - обтачивание цилиндрических наружных поверхностей; д – обработка наружных торцевых поверхностей; е – изготовление внутренних канавок

При черновом растачивании можно получить отверстия с 13...11 квалитетом точности при  $R_a = 25...1,6$  мкм, при чистовом – с 10...8 квалитетом при шероховатости  $R_a = 6,3...0,4$  мкм, при тонком растачивании – с 7...5 квалитетом точности при  $R_a = 3,2...0,2$  мкм.

Для растачивания используют расточные резцы различного типа (проходные, подрезные, прорезные, резьбовые), а также расточные блоки и расточные головки. *Расточные резцы* выполняются в виде стержневых резцов с квадратным, прямоугольным или круглым сечением державки. Расточные резцы крепятся в специальных консольных оправках, закрепленных в шпинделе. На одной оправке можно закрепить несколько резцов, что позволяет обрабатывать ступенчатые отверстия. *Расточные блоки* состоят из корпуса с одной или несколькими парами резцов, регулируемых на диаметральный размер отверстия. Блоки также крепятся в оправке. *Расточные головки* имеют разъемный корпус, что позволяет устанавливать их в любом месте по длине оправки. Они оснащаются двумя стержневыми резцами. Применяют их для обработки отверстий большого диаметра.

**Расточные станки подразделяются** на: горизонтально-расточные, координатно-расточные, алмазно-расточные и специальные. Наиболее широкое применение получили *горизонтально-расточные станки*, которые обладают широкой универсальностью,

позволяют выполнять на них разнообразные виды обработки. *Координатно-расточные станки* предназначены для выполнения отверстий высокой точности и с точным их взаимным расположением (до 0,001 мм). Широко используются они в инструментальном производстве при изготовлении штампов, кондукторов и др. При их применении необходимо термостатирование помещения ( $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). *Алмазно-расточные станки* применяют для финишной обработки отверстий, например, в блоках цилиндров ДВС, в шатунах и др. Это специальные станки и используют их в крупно- и среднесерийных производствах. Они обеспечивают 6...4 качество точности при  $R_a = 0,1 \dots 0,05$  мкм.

### **Технологические требования к конструкциям обрабатываемых деталей**

Желательно отверстия выполнять сквозными, а не глухими. Форма и размеры глухих отверстий должны соответствовать таковым стандартного инструмента.

Поверхность, в которую врезается сверло, должна быть перпендикулярна направлению его движения. На литых цилиндрических деталях необходимо предусматривать плоскости, перпендикулярные к оси отверстия, а на заготовках из проката фрезеровать уступы. Глубокое отверстие заменять двумя неглубокими, но сверлить их с одной установки, вместо двух глухих соосных отверстий рекомендуется выполнять одно ступенчатое. В корпусных деталях рекомендуется применять простые отверстия без выточек. Детали с несколькими соосными отверстиями необходимо конструировать так, чтобы их диаметры последовательно уменьшались в одном направлении, что позволит их изготавливать с одной установки и в один проход. Целесообразно избегать наклонного расположения обрабатываемых поверхностей.

### **6.7. Обработка заготовок на фрезерных станках**

Фрезерование является одним из высокопроизводительных и широко распространенных методов обработки заготовок резанием. При фрезеровании *главным движением резания* является вращение фрезы, а *движением подачи* – поступательное перемещение инструмента или заготовки. Хотя фреза является многолезвийным инструментом, при обработке характерна прерывистость резания каждым

зубом фрезы. Зуб выполняет работу резания только на некоторой части оборота фрезы, а затем продолжает движение не касаясь заготовки.

**По геометрической форме фрезы подразделяются** на: цилиндрические, дисковые, торцевые, концевые, угловые и фасонные (рис. 6.21).

*Цилиндрические фрезы* имеют режущие кромки только на образующей поверхности цилиндра и применяются для обработки плоских поверхностей. Они бывают с прямым и винтовым зубом. Вторые работают - более плавно.

*Дисковые фрезы* имеют ширину значительно меньше диаметра. Режущие кромки могут быть как на образующей цилиндра, так и с боковых сторон. Применяются они для выполнения пазов различной формы.

*Торцевые фрезы* имеют режущие кромки на торцевой поверхности и служат для обработки плоских поверхностей.

*У концевых фрез* режущие кромки располагаются на торцевой и боковой поверхностях. Эти фрезы имеют хвостовик цилиндрической или конической формы. Фрезы предназначены для обработки глубоких пазов, уступов и нешироких плоских поверхностей.

*Фасонные фрезы* применяют для обработки различных фасонных поверхностей (закругленных канавок, зубчатых колес и др.).

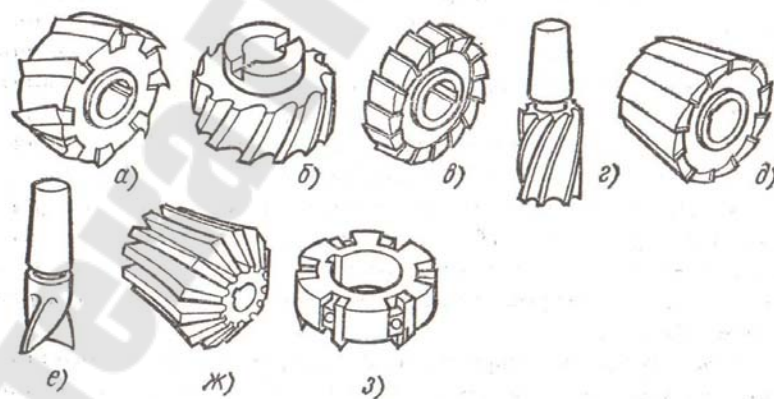


Рис. 6.21. Основные типы фрез

На фрезерных станках обрабатывают горизонтальные, вертикальные и наклонные плоскости, фасонные поверхности, уступы и пазы различных профилей (рис. 6.22).



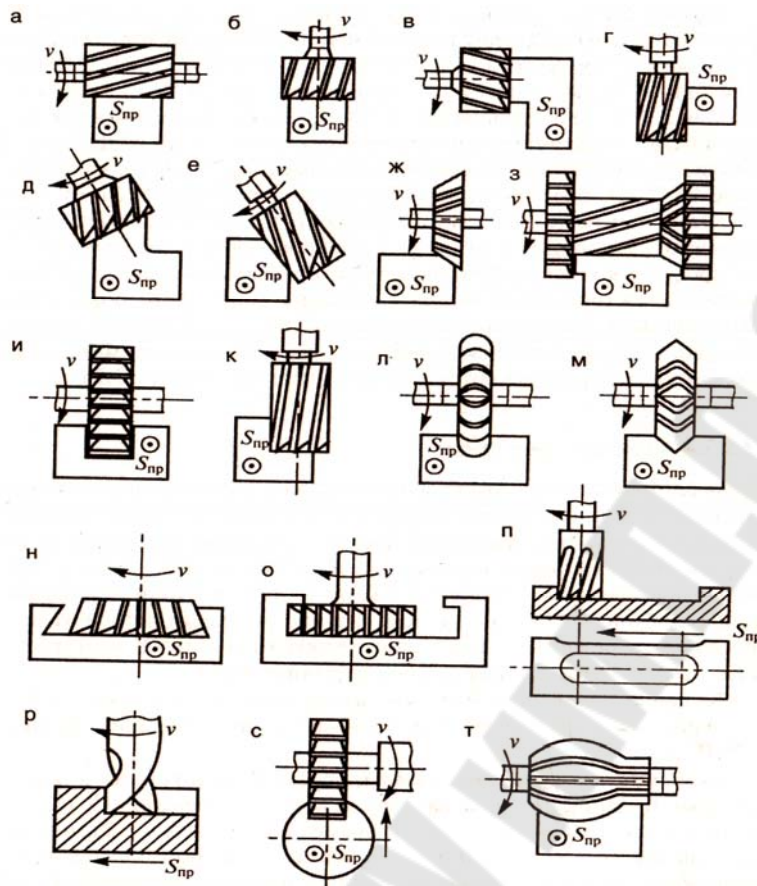


Рис. 6.22. Схемы обработки поверхностей на универсальных фрезерных станках: *а* и *г* – вертикальных; *б* и *в* – горизонтальных; *д* и *е* – наклонных; *ж* и *з* – прямоугольных уступов; *и* и *к* – прямоугольных пазов; *л*, *м* и *р* – фасонных пазов; *н* – одновременно нескольких поверхностей набором фрез; *о* и *п* – изготовление шпоночных пазов.

В зависимости от сочетания направления главного движения и движения подачи, различают встречное и попутное фрезерование (рис. 6.23).

При встречном фрезеровании зуб фрезы врезается при минимальной толщине срезаемого слоя, увеличивающегося по мере продвижения и достигая максимума на выходе зуба из контакта. Нагрузка на зуб увеличивается от нуля до максимума, при этом действующая сила стремится оторвать заготовку от стола, вызывая вибрации и снижая качество обработанной поверхности. В начальный момент происходит проскальзывание зуба по наклонной поверхности, оставленной предыдущим зубом, что вызывает повышенный износ фрезы. При попутном фрезеровании зуб начинает срезать слой максимальной толщины и подвергается максимальной нагрузке с момента контакта с заготовкой, что исключает проскальзывание. Сила, действующая на заготовку, прижимает деталь к столу, что снижает вибрации.

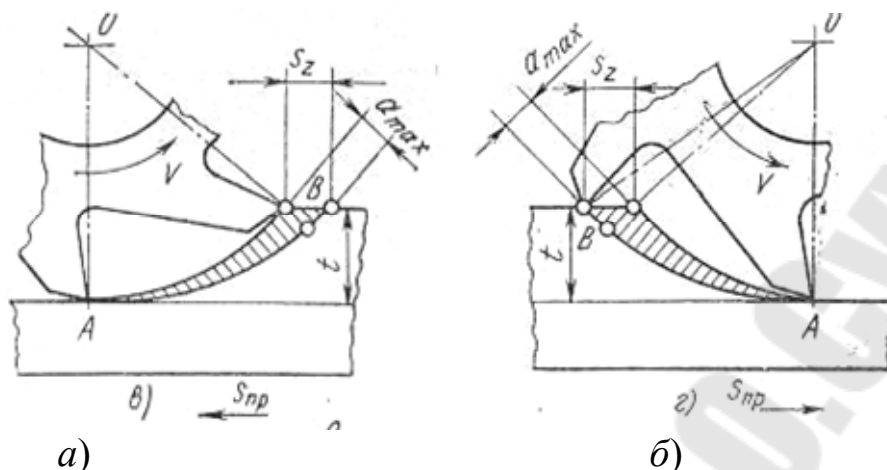


Рис. 6.23. Схема встречного (а) и попутного (б) фрезерования

### Методы закрепления фрез

По способу закрепления фрезы подразделяются на: *насадные*, имеющие центральное отверстие, и *хвостовые*, имеющие хвостовик конической или цилиндрической формы.

Цилиндрические и дисковые фрезы чаще всего применяются при обработке на горизонтально-фрезерных станках и закрепляются на *двухопорных центровых оправках* (рис. 6.24, а). Один конец оправки (конический) крепится в шпинделе, а второй – в серье. *Торцовые фрезы* крепятся на *коротких концевых оправках в шпинделе станка* (рис. 6.24, б). *Хвостовые фрезы* с коническим хвостовиком крепятся *непосредственно в шпинделе* или через *переходные втулки* (рис. 6.24, в). Фрезы с цилиндрическим хвостовиком крепятся в *цанговом или кулачковом патроне*.

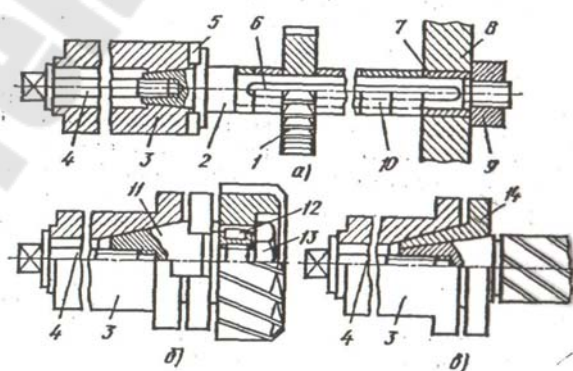


Рис. 6.24. Схемы крепления инструмента на фрезерных станках

### Типы фрезерных станков

*По расположению оси шпинделя в пространстве* фрезерные станки подразделяются на: *горизонтально-фрезерные, вертикально-фрезерные и универсальные*, имеющие возможность поворота стола в горизонтальной плоскости или шпиндельной головки в вертикальной плоскости. Все эти станки консольного типа, обеспечивающие перемещение заготовки по трем координатам, по осям X и Y передвижение салазок и по оси Z – перемещение консоли по направляющим станины.

*У бесконсольных вертикально-фрезерных станков с ЧПУ* крестовый стол с заготовкой имеет перемещение по осям X и Y и шпиндельная головка перемещается по направляющей стойке, обеспечивая передвижение по координате Z. Одновременное перемещение по трем координатам по определенной программе обеспечивает фрезерование фасонных поверхностей.

*Продольно-фрезерные станки* предназначены для фрезерования заготовок больших масс и размеров. Изготавливают их одно- и двухстоечными с длиной стола 1250...12000 мм и шириной 400...5000 мм. Стол этих станков имеет перемещение лишь в продольном направлении по направляющим станины. На стойках располагаются фрезерные головки, перемещающиеся в вертикальном направлении и имеющие возможность поворота. В двухстоечных станках на стойках перемещается траверса в вертикальном направлении, на которой также располагаются шпиндельные головки, что существенно расширяет возможности станка.

Применяются также карусельно-фрезерные и барабанно-фрезерные станки. *В карусельных станках* заготовки крепятся на круглом столе (карусели) с вертикальной осью вращения. *Барабанно-фрезерные* станки имеют барабан с горизонтальной осью вращения, на гранях которого крепятся заготовки, имеющие круговую подачу. Для обработки фасонных поверхностей используют *копировально-фрезерные* станки.

### **Технологические требования к заготовкам, обрабатываемым фрезерованием**

При наличии нескольких выступов на обрабатываемой поверхности целесообразно делать их одной высоты, чтобы обрабатывать за один рабочий ход. Пазы и прорези производительнее делать диско-

выми фрезами, чем концевыми. Радиус паза должен соответствовать стандартным размерам фрезы. Следует предусматривать открытые пазы, т.к. они проще при обработке. При изготовлении глухих пазов необходимо предусматривать отверстие для входа фрезы. Посадочные места под присоединяемые детали на корпусах необходимо располагать с наружной стороны, что упрощает их обработку.

## 6.8. Обработка заготовок на протяжных станках

**Протягивание** – это процесс обработки внутренних и наружных поверхностей многолезвийным режущим инструментом при его поступательном движении относительно заготовки. Этот метод получения поверхностей сложной конфигурации в 10 и более раз эффективнее, чем любые другие процессы резания.

Главным движением при протягивании является поступательное, винтовое или вращательное относительное движение инструмента и заготовки. В большинстве случаев соответствующее движение получает протяжка. Движение подачи заложено в самой конструкции инструмента и осуществляется за счет увеличения размеров его последующих режущих зубьев по сравнению с предыдущим (рис. 6.25).

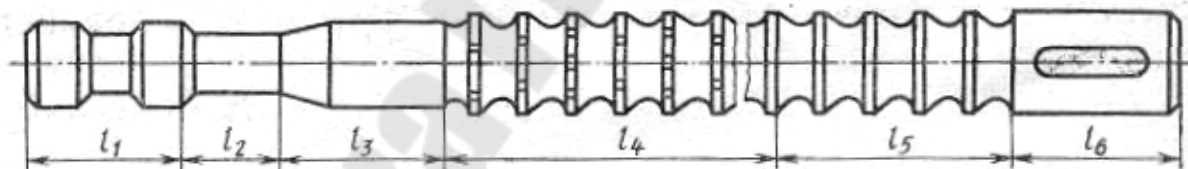


Рис. 6.25. Конструкция протяжки:

- $l_1$  – замковая часть;  $l_2$  – шейка;  $l_3$  – передняя направляющая часть;  $l_4$  – режущая часть;  $l_5$  – калибрующая часть;
- $l_6$  – задняя направляющая часть

Скорость резания при протяжке составляет 1...15 м/мин, но может достигать и до 60...90 м/мин в зависимости от требуемого качества поверхности. Подача на зуб (толщина срезаемого зубом слоя) ~ 0,015...0,35 м/мин в зависимости от обрабатываемого материала, конструкции протяжки, материала протяжки.

Протягивание применяют в основном для обработки круглых, шлицевых, многогранных и др. отверстий, а также шпоночных пазов

и наружных поверхностей разного профиля. Внутренним протягиванием обрабатывают отверстия диаметром от 6 до 250 мм и более. Припуск на обработку составляет 0,6...2,0 мм на диаметр. При необходимости срезания больших объемов металла используют комплект протяжек, но при этом снижается производительность. Точность размеров, получаемых протягиванием деталей, соответствует 6...10 качеству точности при шероховатости  $R_a = 0,2...12,5$  мкм.

**Протяжные станки** отличаются простотой конструкции и подразделяются на: *станки общего назначения и специальные, для обработки внутренних и наружных поверхностей, горизонтальные, вертикальные и непрерывного действия*. Обычно станки имеют гидроривод и работают по полуавтоматическому циклу.

При изготовлении отверстий сложной конфигурации в заготовке 3 сверлится отверстие необходимого диаметра и устанавливается на передней направляющей части протяжки, прижимая к торцу фланца 2, установленного на опорной планшайбе протяжного станка (рис.6.28). Хвостовик протяжки закрепляют в тяговом патроне 1 станка. При совершении рабочего хода режущие зубья 4 протяжки, увеличиваясь по размеру, срезают оставленный на обработку припуск. Окончательно обрабатываемая поверхность по размерам и качеству формируется калибрующими зубьями инструмента. Протяжка в процессе резания испытывает растягивающие напряжения. Инструмент, испытывающий при работе напряжения сжатия, называется *прошивнем*, а процесс – *прошивкой*. Эта схема реализуется на вертикально-протяжных станках. На станках непрерывного действия заготовки крепятся в приспособлениях непрерывно перемещающихся тяговой цепью и сообщаящих им поступательное – главное движение резания относительно неподвижной протяжки. Выпускаются станки с тяговым усилием до 1170 кН и с максимальной длиной хода от 350 до 2300 мм.

Протяжки обычно изготавливают из быстрорежущих сталей или из стали ХВГ. для обработки чугунов и труднообрабатываемых материалов – сборные из твердосплавных режущих элементов. **По характеру обрабатываемых поверхностей** различают протяжки для внутренних и наружных поверхностей. **По форме** подразделяются они на круглые, шлицевые, шпоночные, многогранные и плоские протяжки. **По конструкции зубьев** протяжки бывают режущими, выглаживающими и деформирующими. Они могут выполняться цель-



ными и сборными, со вставными зубьями, оснащенными твердосплавными пластинами.

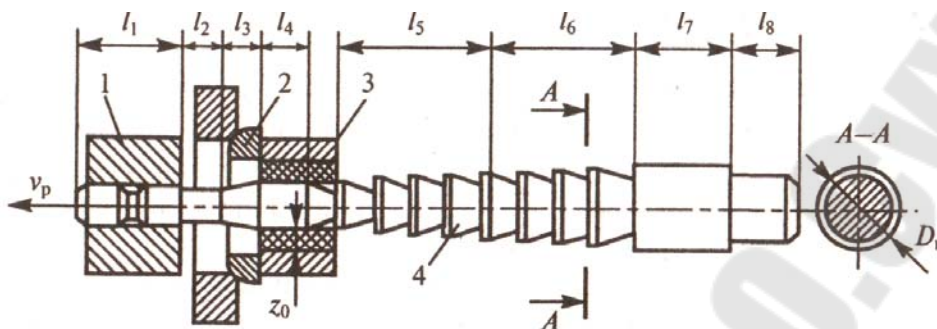


Рис. 6.26. Схема выполнения протяжки

Геометрия зуба приведена на рисунке 6.27. Передний  $\gamma$  и задний  $\alpha$  углы выбираются в зависимости от обрабатываемого материала и точности обработки. Шаг режущих зубьев  $t_p$  определяется в зависимости от длины протягиваемой поверхности, исходя из того, чтобы в резании участвовало не менее трех зубьев. Карман между зубьями должен обеспечить расположение срезаемой стружки. На задних поверхностях калибрующих зубьев может изготавливаться ленточка шириной  $f = 0,2 \dots 1,2$  мм с нулевым задним углом.

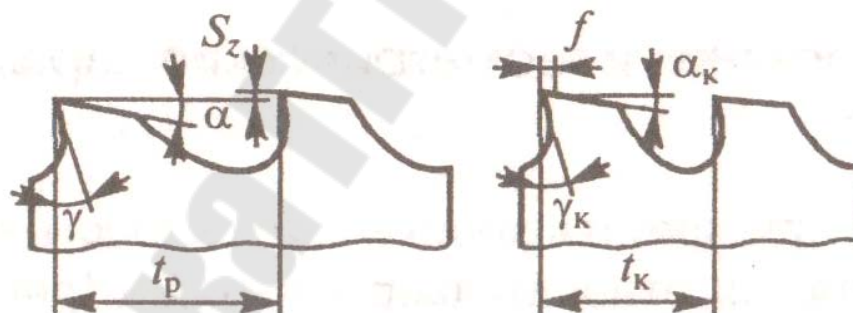


Рис. 6.27. Геометрия зуба протяжки

Шпоночные пазы протягивают плоской протяжкой с использованием направляющей втулки с пазом, в котором перемещается протяжка. На специальных протяжных станках обрабатывают наружные поверхности типа тел вращения. В этом случае заготовкам сообщают круговую подачу. По такой технологии изготавливают зубчатые колеса.

**Технологические требования к конструкциям изготавливаемых деталей**

Обрабатывать протягиванием можно отверстия с достаточно толстыми стенками равномерной толщины.

Торцы протягиваемой заготовки должны быть перпендикулярны к оси отверстия со стороны входа и выхода протяжки.

Отверстия с фасонным сечением следует максимально упрощать и делать их форму симметричной, т.к. в противном случае значительно усложняется форма протяжки.

Шлицевые отверстия в средней части не должны иметь выточек, т.к. это приводит к поломке зубьев протяжки.

### 6.9. Обработка заготовок на зубообрабатывающих станках

На зубообрабатывающих станках обрабатывают фасонные поверхности различного профиля, равномерно расположенные по окружности, в частности, зубчатые колеса эвольвентного профиля. Различают **два метода получения фасонных профилей**: копированием и обкаткой (рис. 6.28).

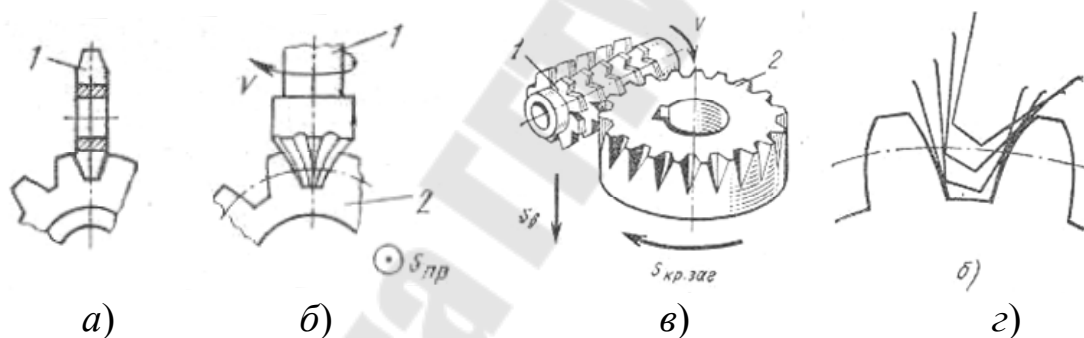


Рис. 6.28. Схемы нарезания зубчатых колес:   
а и б — методом копирования; в и г — методом обкатки

**Копирование** — обработка инструментом, профиль режущей части которого соответствует профилю впадин нарезаемого зубчатого колеса. По методу копирования нарезают зубчатые колеса дисковой модульной фрезой (рис. 6.28а) на горизонтально — или универсально-фрезерных станках и концевой модульной фрезой (рис. 6.28б) на вертикально-фрезерных станках последовательно по одной впадине с использованием делительной головки. *Главное движение резания* — вращательное движение фрезы, *движение подачи* — перемещение заготовки вдоль зуба. По окончании изготовления одной впадины стол

отводят в исходное положение и заготовку поворачивают на  $1/Z$  часть оборота ( $Z$  – число зубьев нарезаемого колеса). Метод обеспечивает невысокую точность (не выше 8 квалитета при  $R_a = 20$  мкм) и низкую производительность. Применяют его в мелкосерийном производстве и при изготовлении зубчатых колес с крупным модулем (более 20 мм). Под модулем  $m$  понимается отношение окружного шага зубьев зубчатого колеса  $S$  по делительной окружности к числу  $\pi$  ( $m = S/\pi$ ).

В условиях крупносерийного производства используются для изготовления зубчатых колес также методы протягивания и с помощью зубодолбежных головок. При использовании последних применяют долбежные станки. В зубодолбежных головках в дисковом корпусе крепятся призматические фасонные резцы, соответствующие профилю впадины зуба. Количество их равно числу зубьев. Резцы имеют возможность перемещаться синхронно в радиальном направлении, обеспечивая радиальную подачу. *Главное движение резания* – возвратно-поступательное движение заготовки.

**Обкатка** – метод, основанный на зацеплении зубчатой пары «режущий инструмент - заготовка». Режущие кромки инструмента имеют профиль зуба сопряженной рейки или колеса. Боковая поверхность зуба на заготовке образуется как огибающая последовательных положений режущих кромок инструмента в их относительном движении (рис. 6.28г). *В качестве инструментов* в этом методе используют зуборезные гребенки, зуборезные долбяки и червячные зуборезные фрезы.

При нарезании зубчатого колеса *гребенкой или долбяком* инструмент совершает *возвратно-поступательное главное движение*, постепенно врезаясь в заготовку в радиальном направлении на высоту зуба. При этом долбяк и заготовка согласованно вращаются, обеспечивая движение обкатки. С помощью гребенки нарезают зубчатые колеса только внешнего зацепления, а долбяком – и внутреннего зацепления. Точность зубчатых колес, получаемых на зубодолбежных станках, в пределах 8...7 квалитета при  $R_a = 3,2...1,6$  мкм, а при нарезании гребенкой – 7...5 квалитета при  $R_a = 3,2...0,8$  мкм.

*Червячная модульная фреза* имеет зубья, расположенные по винтовой линии. Заготовка и фреза вращаются вокруг своих осей таким образом, что за один оборот фрезы заготовка поворачивается на один зуб (для однозаходной фрезы). Кроме того фреза имеет возможность вертикального перемещения, обеспечивая движение вертикальной подачи (рис. 6.28в). Точность колес, полученных по этому методу, в пределах 10...8 квалитета с  $R_a = 3...3,2$  мкм. В процессе контакта



режущих кромок инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки каждый последующий зуб фрезы, движущейся по собственной траектории, повторяет эвольвентную поверхность зуба – обкатывается. Метод обеспечивает высокую производительность, отпадает необходимость применения делительных головок.

**Конические зубчатые колеса** нарезаются на зубострогальных станках. В качестве инструмента применяют зубострогальные резцы, используемые попарно, которые нарезают одну впадину.

Чистовую обработку зубчатых колес производят **шевенгованием**, при котором с боковых поверхностей удаляется стружка толщиной 0,005...0,1 мм. В качестве режущего инструмента используют шеверы. *Шеверы* представляют собой косозубое колесо или рейку, на боковых поверхностях зубьев которых, имеются режущие кромки, образованные созданными там канавками. Для обработки *червячных колес* используют червячные шеверы. Зубчатое колесо и шевер вводят в беззазорное зацепление при скрещенных осях. Шевер, приводимый во вращение, ведет зубчатое колесо, установленное на оправке в центрах. В процессе обкатки в результате бокового скольжения происходит срезание тонкой стружки. Точность зубчатых колес после шевенгования соответствует 7 – 6 качеству при  $R_a = 1,25 \dots 0,68$  мкм. Шевенгуют колеса с твердостью не выше 35HRC<sub>3</sub>.

### **Технологические требования к конструкциям зубчатых колес**

Конструкция зубчатого колеса должна быть симметричной, чтобы предотвратить коробление зубьев при термообработке.

Желательна конструкция колеса без ступиц, что дает возможность нарезать их «пакетами».

При конструировании многовенцовых колес и колес с буртиками необходимо обеспечивать возможность свободного выхода инструмента.

### **6.10. Обработка заготовок на шлифовальных станках**

**Шлифованием** называется процесс обработки заготовок резанием инструментом, рабочая часть которого содержит частицы абразивного материала. Твердость этих частиц превышает твердость обрабатываемого материала. В зависимости от используемого абразива различают алмазные, эльборные, электрокорундовые, карбидокремниевые и др. абразивные инструменты (шлифовальные круги).

*В отличие от резания лезвийным инструментом* при шлифовании в процессе резания участвует одновременно большое количество зерен, которые срезают тонкие стружки со скоростью резания от 30 до 125 м/с. *Обработанная поверхность* представляет собой совокупность микроследов контактирующих абразивных зерен, которые и определяют ее шероховатость. Часть зерен, неспособных к резанию вследствие своего расположения, производят работу трения по поверхности резания, производя тепловое и силовое воздействие на поверхностные слои, что приводит к структурным превращениям в них и изменению физико-механических свойств. Шлифование применяется для чистовой и отделочной обработки деталей с высокой точностью.

Для осуществления процесса шлифования необходимо вращательное движение абразивного круга и относительное перемещение круга или заготовки по одной из координатных осей. *Основными параметрами режима резания* являются скорость главного движения резания, подача и глубина резания. *Скорость главного движения резания* равна окружной скорости точки на образующей шлифовального круга (м/с)

$$V_k = \pi \cdot D_k \cdot n / (1000 \cdot 60),$$

где –  $n$  – частота вращения круга, об/мин;  $D_k$  – наружный диаметр шлифовального круга, мм.

*Глубина резания* определяется толщиной срезаемого слоя за один проход. Оптимальные режимы резания выбираются по справочным данным. Качество поверхности зависит от выбора совокупности основных технологических параметров.

## **Абразивные инструменты**

Абразивные инструменты различают по геометрической форме и размерам, типу и размерам абразивного материала, виду связующего вещества, твердости и строению круга.

*Основу шлифовальных кругов* составляют абразивные зерна, которые представляют собой фрагменты природной или синтетической керамики (оксидной, карбидной, нитридной и др.), размеры которых составляют от 1 до 4000 мкм. Чем крупнее зерно, тем выше производительность и выше шероховатость обработанной поверхности. Вещество, обеспечивающее закрепление абразивных частиц в материале, называется *связкой*. Чаще всего инструмент изготавливают

на керамической, бакелитовой и вулканитовой связках. Наибольшее применение получила керамическая связка, состоящая из огнеупорной глины с добавками полевого шпата и кварца. Обозначаются эти связки буквой К с цифрами – К0, К1, ... К8. Силикатная связка обозначается буквой С, бакелитовая (на основе фенолформальдегидной смолы) – буквой Б, вулканитовая (на основе каучуков) – буквой В.

*Твердость круга* характеризует способность связки удерживать зерна в круге, противостоять изнашиванию и сохранять свою геометрическую форму. Круги подразделяются на : мягкие (М1, М2, ...), средне мягкие (СМ1, СМ2), средние (С1, С2), средне твердые (СТ1, СТ2, СТ3), твердые (Т1, Т2), весьма твердые (ВТ1, ВТ2), чрезвычайно твердые (ЧТ1, ЧТ2).

*Внутреннее строение круга* характеризуется объемным соотношением абразивных зерен, связки и воздушных пор, что регламентируется номерами от 0 до 18. Плотные 0...4, средние 5...8, открытые 9...12, высокопористые 13...18. Чем выше номер, тем больше пористость. Высокопористые материалы применяют для шлифования вязких материалов, стремясь предотвратить засаливание. Формы шлифовальных кругов весьма разнообразны (рис.6.29). Широко используются: плоские прямого профиля – ПП, плоские с выточкой – ПВ, чашечные цилиндрические – ЧЦ, чашечные конические – ЧК, тарельчатые – Т, дисковые – Д. Круги из искусственных сверхтвердых материалов (СТМ) имеют металлический корпус с покрытием на режущей части, содержащим абразивные зерна. Толщина абразивного слоя составляет 1,5...3 мм. В обозначении этих кругов впереди добавляется буква А или Л.

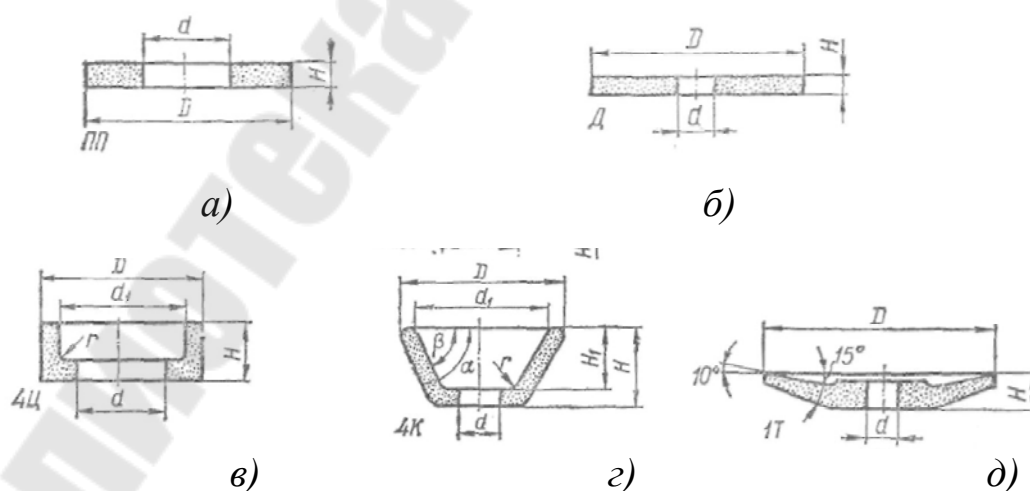


Рис. 6.29. Формы шлифовальных кругов:

**Маркировка круга** производится на торцовой поверхности, где указывается: завод изготовитель (1), тип круга (2), размеры – наруж-

ный диаметр, толщина и посадочный диаметр в мм (3), материал абразивных зерен (4), номер абразивных зерен (5), твердость круга (6), номер структуры круга (7), тип связки (8), предельная рабочая скорость (9), класс неуравновешенности круга (10) и номер ГОСТа.

*Пример условного обозначения шлифовального круга, изготовленного на Лужском абразивном заводе, типа 1, наружного диаметра 450мм, высотой 63мм, диаметром посадочного отверстия 203мм, из белого электрокорунда 25А, зернистостью F60, твердостью К, номером структуры 6, на керамической связке V, с предельной рабочей скоростью 50м/с, 2-го класса неуравновешенности.*

**ЛАЗ 1 450x63x203 25А F60 К6 V 50м/с 2кл. ГОСТ 52781-2007**

### **Износ и правка шлифовальных кругов**

В процессе шлифования режущие свойства круга изменяются вследствие изнашивания абразивных зерен, их раскалывания, заполнения пор между зернами продуктами шлифовальных отходов. Это приводит к росту сил резания, отклонению геометрических форм инструмента. Для восстановления режущих свойств инструмент подвергают правке, чаще всего алмазными карандашами. Толщина удаляемого слоя шлифовального круга не превышает 0,01...0,03 мм. Время работы круга между очередной правкой называется *стойкостью инструмента*. В зависимости от требований к качеству обработки и режимов резания она может составлять от 5 до 40 минут.

### **Обработка заготовок на кругло-шлифовальных станках**

Для всех схем шлифования *главным движением резания является вращение шлифовального круга. При кругло-шлифовальной обработке движение продольной подачи обеспечивается возвратно-поступательным перемещением заготовки и выражается в мм/об.заг. Вращение заготовки является движением круговой подачи  $S_{кр}$ . Движение поперечной подачи, обеспечивающее глубину резания, осуществляется прерывисто при крайних положениях заготовки. При внутреннем шлифовании движения аналогичны.*

Деталь обычно крепится в центрах, а движение круговой подачи осуществляется за счет поводкового устройства (рис. 6.30). Возможно закрепление заготовки в кулачковом патроне. Обработка может осуществляться с продольной подачей (рис. 6.30 а), при этом заготовка

вращается и совершает возвратно-поступательное движение. В конце каждого хода круг совершает поперечную подачу.

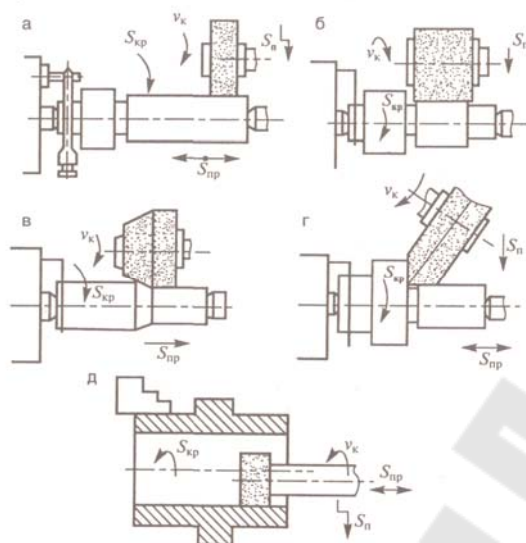


Рис. 6.30. Схемы круглого шлифования

**Врезное шлифование** (рис. 6.30 б) применяют при обработке поверхностей, ширина которых меньше ширины круга. В этом случае заготовка равномерно вращается, а круг вращается с постоянной скоростью движения поперечной подачи  $S_{\text{п}}$  мм/об.заг. до достижения требуемого размера. Этот метод применяют для шлифования канавок.

**Глубинное шлифование** (рис. 6.30 в) обеспечивает съём металла на необходимую глубину за один проход. На круге имеется конический участок шириной 8...12 мм, обеспечивающий постепенное врезание, а цилиндрический участок обеспечивает зачистку обработанной поверхности.

**Шлифование уступами** (рис. 6.30 г) представляет собой сочетание методов (а) и (б). Сначала снимается большая часть металла врезным шлифованием, а затем зачистка производится с продольной подачей.

Обеспечение правильного взаимного расположения торцевой и цилиндрической поверхностей обеспечивают шлифованием специальными кругами с поворотом оси вращения круга (рис. 6.30 д).

**Конические поверхности** можно шлифовать двумя способами. При обработке в центрах – верхнюю часть стола вместе с центрами поворачивают на нужный угол, чтобы положение образующей конической поверхности совпадало с направлением движения продольной подачи. Далее шлифуют как обычные цилиндрические поверхности.

При шлифовании с консольным закреплением заготовки в патроне на нужный угол поворачивают переднюю бабку.

**На внутришлифовальных станках** обрабатывают сквозные, глухие, конические и фасонные отверстия. Обработка ведется шлифовальными кругами диаметром  $0,7 \dots 0,9 D_{\text{отв}}$ . Обработка поверхностей в заготовках, закрепленных в патроне, производится вращающимся инструментом, имеющим продольную и поперечную подачи. Крупногабаритные заготовки обрабатывают планетарным шлифованием, при котором заготовка крепится неподвижно, а шлифовальный круг вращается вокруг своей оси, а также вокруг оси отверстия, что аналогично круговой подаче.

**На бесцентрово-шлифовальных станках** заготовки обрабатывают между двумя вращающимися в одном направлении шлифовальными кругами в незакрепленном состоянии. Отпадает необходимость в центровых отверстиях. Детали при обработке опираются на поддерживающий упор (нож). Для придания продольной подачи бабку ведущего круга поворачивают на небольшой угол. Заготовки ступенчатой формы шлифуют методом врезания.

### **Обработка заготовок на плоскошлифовальных станках**

При плоском шлифовании возвратно-поступательное движение заготовки обеспечивает *продольную подачу*  $S_{\text{пр}}$ . Для обработки деталей шириной, превышающей ширину круга, обеспечивается поперечная подача  $S_{\text{п}}$ , которая происходит прерывисто в конце продольного хода. Прерывисто обеспечивается и вертикальная подача  $S_{\text{в}}$ , обеспечивающая глубину резания. Эта подача осуществляется в конце поперечного хода. Обрабатываемые заготовки размещаются на прямоугольном или круглом столе станка. На станках с прямоугольным столом продольная подача обеспечивается возвратно-поступательным движением стола, а на станках с круглым столом за счет вращения стола обеспечивается круговая подача. Шлифование производят периферией (рис. 6.31 а) и торцовой (рис. 6.31 б) поверхностью круга. Заготовки крепятся с помощью магнитных плит или в приспособлениях. Возможно закрепление одновременно нескольких заготовок, обрабатываемых на один размер (рис. 6.31 в, г).

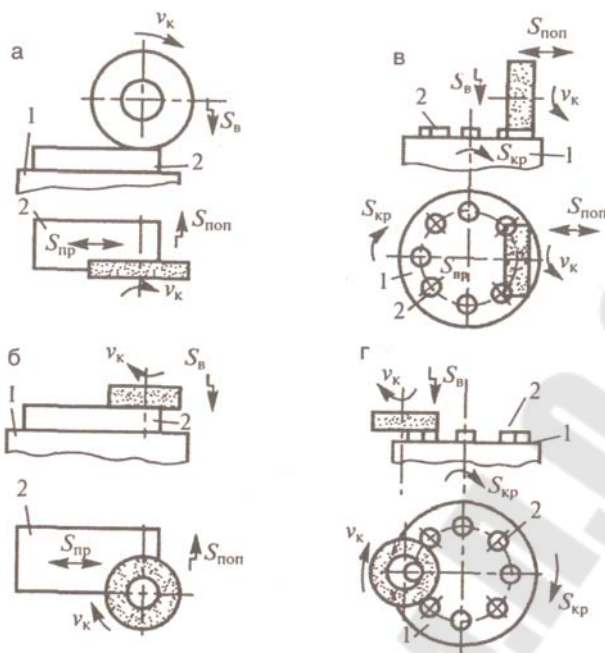


Рис. 6.31. Схемы обработки на плоскошлифовальных станках

### Технологические требования к конструкциям обрабатываемых деталей

Для обрабатываемых сплошных валов предусматриваются центровые отверстия, а для полых – установочные фаски. Точно обрабатываемые участки валов необходимо разделять введением проточек. Проточки необходимо предусматривать для выхода шлифовального круга в случае шлифования участка вала, соседствующего с поверхностью большего диаметра. Поверхности точно обрабатываемых осевых отверстий необходимо разделять выточками. Шлифуемые поверхности желательно располагать в одной плоскости параллельно или перпендикулярно основанию, на котором крепится заготовка.

### Обработка поверхностей эластичным абразивным инструментом

**К эластичным абразивным инструментам относятся:** абразивные ленты, абразивная бумага, эластичные круги из войлока, фетры и других материалов, щетки и др. специальные инструменты.

**Режущими элементами** являются абразивные зерна, закрепленные или нанесенные в виде паст на эластичную основу инструмента, ворс щеток, абразив в составе тел из синтетических материалов. В процессе обработки режущие элементы упруго прижимаются к обрабатываемой поверхности. Удаляемые припуски гораздо меньше, чем при обработке жестким абразивным инструментом и применяют



шлифование эластичными инструментами в основном для улучшения качества поверхности.

**При шлифовании абразивной лентой**, она прижимается к обрабатываемой поверхности роликами, плитами, копирами, прижимными механизмами. В качестве инструментов с абразивной лентой могут использоваться металлические ролики, диски, на рабочей поверхности которых крепится лента, а также бесконечная лента, движущаяся относительно заготовки с помощью вращающихся роликов. При размерном шлифовании припуск на обработку планируется в пределах 0,5...5 мм. Шероховатость после обработки  $R_a = 1,25...2,5$  мкм. При безразмерном шлифовании (полировании) припуск на обработку составляет 0,02...0,09 мм и шероховатость поверхности после обработки составляет  $R_a = 0,02...0,32$  мкм.

### 6.11. Методы отделочной обработки поверхностей

Предел выносливости, контактная усталость, долговечность и износостойкость узлов трения в значительной степени зависят от качества обработки поверхностей, в частности, от их шероховатости. Снижение шероховатости требуется для определенных поверхностей с целью повышения их отражательной способности, снижения сопротивления обтеканию газами и жидкостями, а также для других целей. Для снижения шероховатости поверхностей, получаемых при обработке лезвийным инструментом или шлифованием, применяют отделочную обработку. **Основные видами отделочных обработок** являются: тонкое точение, тонкое шлифование, полирование, абразивно-жидкостная отделка, притирка, хонингование, суперфиниширование.

**Тонкое точение** производится при высоких скоростях резания (более 100 м/мин), малых глубинах резания ( $t = 0,05...0,3$  мм) и подачах ( $S = 0,02...0,5$  мм/об). При таких режимах мало тепловыделение в поверхностном слое, что уменьшает термические напряжения в нем и его дефектность, повышает точность и обеспечивает малую шероховатость. Применяется тонкое точение вместо шлифования для деталей из вязких материалов, тонкостенных деталей, при обработке глухих отверстий.

**Тонкое шлифование** выполняют мягкими мелкозернистыми шлифовальными кругами при больших скоростях главного движения резания ( $V = 40$  м/с и более) и малых глубинах резания ( $t$  до 5 мкм).



**Полирование** производится вращающимися эластичными кругами или лентами в присутствии абразивного материала, смешанного со смазочным материалом. Полирование применяется только для уменьшения шероховатости, придания зеркального блеска и для декоративных целей. Полирование не исправляет геометрической формы и локальные дефекты, образуемые при предшествующей обработке. Полировальные круги или ленты изготавливаются из войлока, фетра, кожи, бумаги, синтетических и др. материалов. В качестве абразива используют порошки из электрокорунда, карбида кремния, оксида хрома, оксида железа. Смазочный материал состоит из смеси воска, сала, парафина и керосина. Абразивная смесь наносится на полировальную ленту (круг) или на обрабатываемую поверхность. Процесс полирования проводится на больших скоростях резания ( $V$  более 50 м/с). Основные схемы полирования приведены на рисунке 6.32. Обработка обеспечивается за счет тонкого резания, пластического деформирования поверхностного слоя и воздействия на металл химически активных веществ, содержащихся в пасте. Применяется также **магнитно-абразивное полирование**, при котором абразивные зерна, находящиеся в зазоре между вращающейся заготовкой и колеблющимся вдоль заготовки электромагнитами, ориентируются магнитным полем перпендикулярно обрабатываемой поверхности и совершают микрорезание. Этот метод применим для осесимметричных деталей.

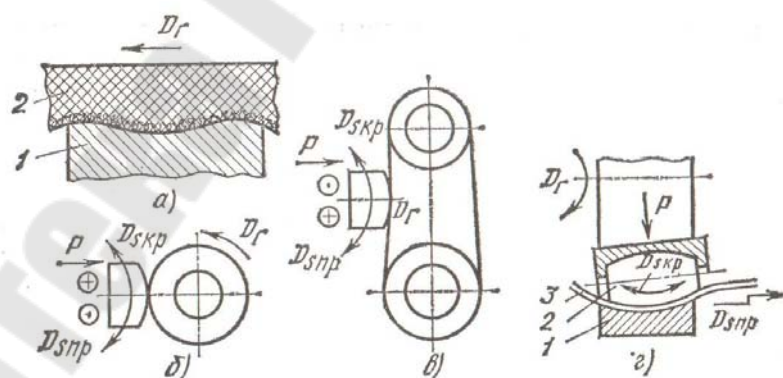


Рис. 6.32. Схемы полирования поверхностей:  
1 - заготовка; 2 - носитель пасты

**Абразивно-жидкостная отделка** применяется для обработки фасонных поверхностей. На обрабатываемую поверхность подают со скоростью около 50 м/с под давлением струю антикоррозионной жидкости, со взвешенными частицами абразивного порошка (рис. 6.33).

Частицы абразива, ударяясь о поверхность с большой скоростью, сглаживают микронеровности. В качестве абразива используют в основном мелкие и микропорошки электрокорунда (30...35 % масс.). Толщина съема металла зависит от угла установки форсунки  $\beta$ . Максимальная производительность достигается при  $\beta = 45^\circ$ . Особенно эффективен метод при обработке внутренних поверхностей. При этом сопло вводится в полость заготовки, которая совершает необходимые вращательные и поступательные перемещения, в зависимости от профиля полируемой поверхности.

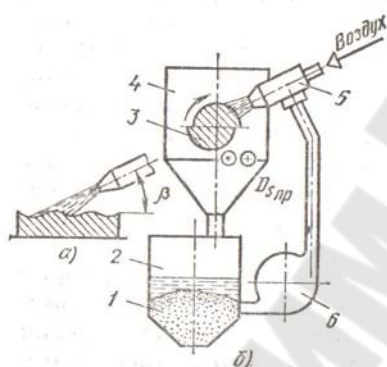


Рис. 6.33. Схема гидроабразивной обработки:  
 1 – абразивная суспензия; 2 – бак;  
 3 – обрабатываемая деталь; 4 – камера;  
 5 – сопло; 6 – насос

**Притирка** поверхностей производится с целью устранения незначительных отклонений геометрической формы и размеров, а также уменьшения шероховатости поверхности. Процесс осуществляется с помощью притиров соответствующей геометрической формы, на рабочие поверхности которых наносится притирочная паста, состоящая из мелкого абразивного порошка со связующей жидкостью. Притиры изготавливают из более мягкого материала, чем обрабатываемый (серого чугуна, меди, бронзы, дерева). Используют абразивные порошки из электрокорунда, карбида кремния и бора, оксида хрома. Для получения абразивных паст используют химически активные вещества (олеиновую или стеариновую кислоты). Связующими жидкостями служат машинное масло, керосин, стеарин, вазелин. Абразив внедряется в поверхность притира и удерживается в нем. При взаимном разнонаправленном перемещении притира и заготовки каждое контактирующее с поверхностью зерно снимает весьма тонкую стружку. Сглаживанию микронеровностей способствуют химически активные вещества, находящиеся в зоне обработки. Притиры, в зависимости от

обрабатываемых поверхностей, могут быть плоскими (для обработки плоских поверхностей), цилиндрическими разрезными (для обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей), выпуклыми или вогнутыми (для обработки сферических поверхностей), в виде грибков и др. (для обработки различных фасонных поверхностей).

**Хонингованием** называется отделочная обработка поверхностей мелкозернистыми брусками. Оно применяется для получения поверхностей высокой точности и малой шероховатости, устранения отклонений от геометрической формы отверстий (овальности, конусности), а также создания микропрофиля на поверхности в виде сетки для удержания смазки при работе узлов трения. Бруски закрепляются в хонинговальной головке, совершающей вращательное и возвратно-поступательное движения (рис.6.34). Соотношение скоростей движения от 1,5 до 10 и определяется условиями резания. Абразивные бруски раздвигаются в радиальном направлении изнутри хона. Зона обработки обильно охлаждается смазочно-охлаждающей жидкостью. Хонингование широко используется для обработки цилиндров двигателей внутреннего сгорания, компрессоров, деталей гидравлических систем.

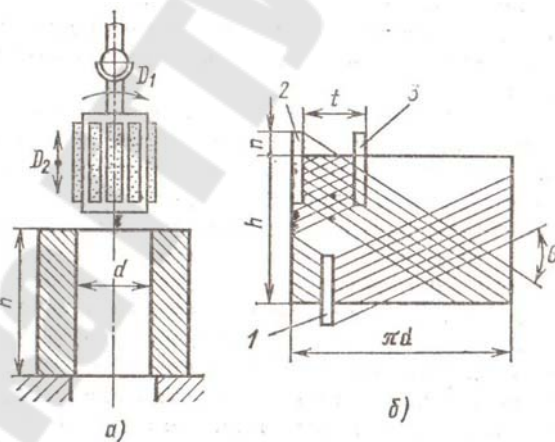


Рис. 6.34. Схема хонингования

**Суперфинишированием** называется процесс отделочной обработки мелкозернистыми абразивными брусками с целью снижения шероховатости обрабатываемой поверхности и нанесения на ней сетчатого рельефа. В отличие от хонингования этот метод не исправляет отклонений геометрической формы заготовки. Поверхности обрабатываются абразивными брусками, установленными в специальные головки. Для суперфинишной обработки характерно колебательное движение брусков с амплитудой 2...6 мм, частотой 400...1200 колебаний в минуту, наряду с движением заготовки. Обработка ведется

при давлении брусков 50...300 кПа в присутствии смазочно-охлаждающих жидкостей малой вязкости. Скорость главного движения резания составляет 0,08...0,2 м/с. Соотношение скоростей движения вращательного заготовки и возвратно-поступательного головки в начале обработки составляет 2...4, а в конце – 8...16. В качестве СОЖ используют смесь керосина (80...90 %) с веретенным или турбинным маслом. Припуск на обработку 5...10 мкм снимается за 30...60 секунд. Осуществляется суперфинишная обработка на токарных и шлифовальных станках с помощью специальных приспособлений и на специальных станках.

### **Обработка заготовок без снятия стружки**

Методы обработки без снятия стружки основаны на использовании пластических свойств металлов, обеспечивают упрочнение поверхностей, повышают надежность работы деталей, износостойкость, стойкость к коррозии. К ним относятся: обкатывание и раскатывание, алмазное выглаживание, калибровка отверстий, вибронакатывание, накатывание резьбы, шлицов и зубчатых колес.

*Обкатыванием и раскатыванием* упрочняют цилиндрические, конические, плоские и фасонные поверхности. В качестве инструментов используются шарики или ролики высокой твердости, перемещающиеся относительно заготовки. Обкатываются, как правило, наружные поверхности, раскатываются внутренние. При обкатывании роликами основными параметрами режима упрочнения являются: давление в зоне контакта, число его проходов, подача и скорость обкатывания. Глубина деформированного слоя определяется давлением. Обкатывание и раскатывание производят обычно на токарных и карусельных станках. Чрезвычайно большое давление и большое число проходов инструмента могут привести к разрушению поверхности.

*Алмазное выглаживание* заключается в скольжении прижатого алмазного инструмента по обрабатываемой поверхности. При этом неровности, оставшиеся после механической обработки, сглаживаются. Рабочая часть инструмента выполняется в виде сферы, цилиндра или конуса. Этот метод позволяет обработку тонкостенных деталей и деталей сложной конфигурации на токарных станках при малых нагрузках (50...300Н). Процесс ведут с применением смазки веретенным маслом. Число проходов инструмента не более двух.

*Калибровка отверстий* производится с целью повышения точности отверстий и качества поверхности. Инструментом служит ша-

рик или дорн, размеры поперечного сечения которого несколько больше размеров отверстия. Заготовка обрабатывается за один или несколько проходов под действием сжимающей или растягивающей силы. При движении инструмента сглаживаются неровности, исправляются погрешности геометрической формы отверстия, упрочняется поверхность. Обработку производят с применением смазок, что снижает усилие деформирования, увеличивает стойкость инструмента и качество поверхности. Калибровка отверстий производится на прессах или горизонтально-протяжных станках.

**Вибронакатывание** применяют с целью создания на поверхности трения деталей машин слабозаметных, прилегающих друг к другу канавок для удержания смазочного материала и мелких частиц, образовавшихся в процессе изнашивания. Обработку производят для тел вращения на токарных станках. В качестве инструмента используют обычно шарик или алмазный наконечник, который устанавливается в резцедержателе. Кроме продольной подачи шариком сообщается дополнительно движение с относительно малой амплитудой и частотой колебаний. Возможно накатывание как внешних, так и внутренних поверхностей.

### **Накатывание резьбы, шлицов и зубчатых колес**

Профиль накатываемых деталей образуется за счет вдавливания инструмента в материал заготовки и выдавливания части его во впадины инструмента. При этом волокна исходной заготовки в поверхностном слое не перерезаются, как при резании, что обеспечивает более высокое их сопротивление усталости, чем при обработке резанием. При формировании резьбы плашками, заготовка 2 прокатывается между подвижной 3 и неподвижной 1 плашками с профилем накатываемой резьбы (рис. 6.35а). При накатке резьбы роликами, заготовка 2 перемещается между двумя роликами 1 и 3, имеющими профиль резьбы, вращающимися в одном направлении и вдавленными на необходимую глубину (рис. 6.35б). Этот метод требует меньших усилий деформирования и применяется для изготовления резьбы с более крупным шагом.

Накатывание шлицов производится накатными роликами, имеющими профиль соответствующих шлицов. Ролик под определенным усилием внедряется в поверхность заготовки при вращательном и поступательном движении вдоль оси заготовки (рис. 6.35в). Об-



работа ведется на специальных станках. Аналогичным образом производится накатка зубчатых мелко модульных колес на специальных станках (рис. 6.35г). Метод накатывания применяют также для нанесения на поверхность рифлений, клейм.

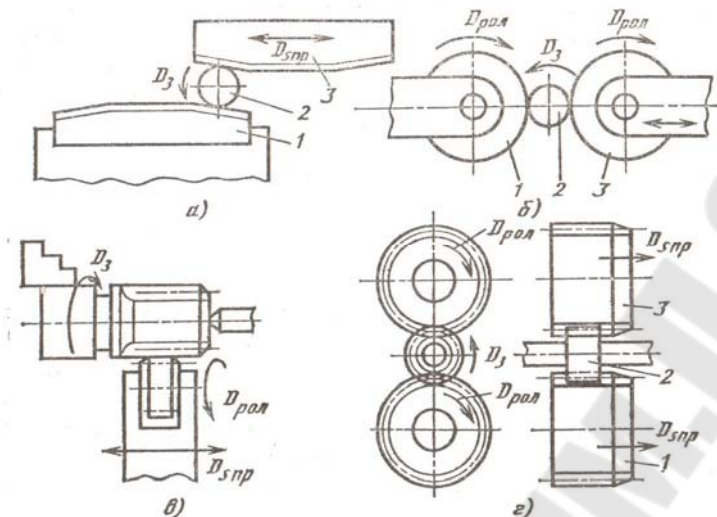


Рис. 6.35. Схемы операций, выполняемых накатыванием

## 6.12. Электрофизические и электрохимические методы обработки

### 6.12.1. Общая характеристика процессов

При механической обработке материалов в технологическом оборудовании электрическая энергия превращается в механическую. Далее за счет силового воздействия на инструмент происходит формоизменение заготовки. Электрофизические и электрохимические способы обработки основаны на непосредственном воздействии различных видов энергии (электрической, химической и др.) на обрабатываемую заготовку и осуществлении при этом ее формоизменения. При обработке этими методами практически отсутствует силовое воздействие инструмента на заготовку или оно настолько мало, что оно не оказывает существенного влияния на суммарную погрешность обработки и свойства поверхностного слоя обработанной поверхности. Эти методы позволяют одновременно формообразование всей поверхности детали независимо от ее сложности. Процесс легко автоматизируется, позволяет обработку различных материалов независимо от их твердости, вязкости и др. свойств. Недостатком является повышенная энергоемкость по сравнению с механической обработкой, необходимость в использовании специального оборудования.

**В зависимости от физики процессов, используемых при обработке**, эти методы подразделяют на следующие группы:

– методы, основанные на использовании теплового воздействия электрического тока (электроэрозионная, световая, электронно-лучевая, плазменная обработки);

– методы, основанные на использовании химического воздействия электрического тока (электрохимическая обработка);

– методы, основанные на использовании механического действия электрического тока и электромагнитного поля (ультразвуковой, электрогидравлический, магнитно-импульсный);

– методы комплексные, сочетающие использование одновременного действия нескольких явлений (электроконтактная, анодно-механическая, электро-абразивная, электро-эрозионно-ультразвуковая обработка и др.).

**При электроэрозионной обработке (ЭЭО)** используется явление эрозии (разрушения) электродов из токопроводящих материалов при пропускании между ними электрического тока. Заготовку и инструмент из токопроводящих материалов подключают к источнику тока (генератору импульсов) и помещают в диэлектрическую жидкость. При сближении электрода-инструмента (Э-И) и электрода-заготовки (Э-З) на расстояние 10...50 мкм между микровыступами возникает разряд и образуется канал проводимости, в котором от катода к аноду движется поток электронов. Навстречу им движется поток более тяжелых частиц – ионов. Электроны быстрее достигают поверхности анода, поэтому энергия электрического разряда смещается ближе к аноду (рис. 6.36.) Температура электрического разряда достигает 10...12 тысяч градусов. Происходит мгновенное оплавление и частичное испарение элементарного объема материала заготовки. Так как время протекания разряда мало ( $10^{-15}$ ... $10^{-8}$  с), то процесс выделения энергии сопровождается микровзрывом, вследствие чего расплавившиеся частицы металла выбрасываются в окружающую среду. Охлажденные диэлектрической средой они застывают в виде шариков размером 0,01...0,005 мм, образуя шлам. На поверхности анода образуется лунка. Поверхность катода тоже подвергается частичному эрозионному разрушению. Затем пробой происходит в другом месте. Так продолжается до тех пор, пока не снимется требуемый слой металла. В результате расстояние между электродами становится таким, что при данном напряжении пробой становится невозможным и наступает момент прекращения обработки. Для продолжения обработки необходимо

дальнейшее сближение электродов до заданных размеров заготовки, что обеспечивается специальной следящей системой). *Электроэрозионную обработку в зависимости от параметров импульсов и используемого оборудования* подразделяют на *электроискровую, электроимпульсную, высокочастотную и электроконтактную*.

*Электроимпульсную обработку* применяют для предварительной обработки заготовок. При высокочастотной электроискровой обработке используют импульсы малой мощности с частотой 100...1500 кГц. Метод обеспечивает высокую производительность (в 30...50 раз выше, чем при электроискровом) при меньшей шероховатости поверхности. Процесс ведется при прямой полярности (рис. 6.38). Разрядный контур включается во вторичную цепь трансформатора. Разряд происходит при замыкании первичной цепи трансформатора прерывателем (вакуумной лампой или тиратроном).

При *электроискровой обработке* используется разряд малой длительности  $10^{-15} \dots 10^{-7}$  с при прямой полярности подключения электродов (плюс – заготовка, минус – инструмент). В зависимости от мощности разрядов режимы обработки делятся на жесткие и средние (для предварительной обработки), мягкие и очень мягкие (для окончательной обработки). Мягкий режим обеспечивает точность размеров до 0,002 мм при шероховатости до 0,01 мкм. Обработка ведется на станках с RC генератором, состоящим из зарядного и разрядного контуров. Зарядный контур включает источник тока с напряжением 100...200 В, конденсатор С и сопротивление R. Разрядный контур подключен параллельно конденсатору и включает инструмент и заготовку. Как только напряжение достигает пробойного при данном зазоре, так происходит пробой диэлектрика и проскакивает искра. Производительность процесса регулируется величиной R и C (рис. 6.36). Инструмент выполняется из меди, латуни или углеграфитовых материалов. Однако производительность процесса невысока, большой износ электродов-инструментов и существенная толщина дефектного слоя на поверхности от 0,05...0,5 мм. Метод применяют для обработки токопроводящих материалов, в частности, деталей штампов, прессформ, фильер, режущего инструмента и др. В промышленности применяются координатно-прошивные, копировально-вырезные, универсально-прошивочные станки с ЧПУ.



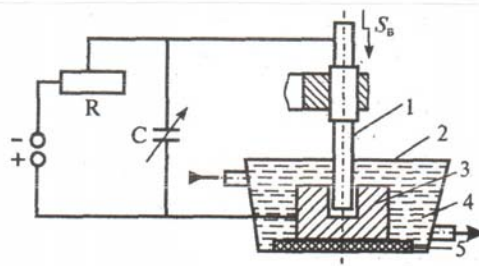


Рис. 6.36. Схема электроискровой обработки

**Электроимпульсная обработка** характеризуется большей длительностью электрического разряда (0,5...10с), приводящего к интенсивному разрушению катода. При этом используется обратная полярность включения электродов. Износ электродов-инструментов в данном случае меньше. Электроимпульсный режим реализуется на установках с электромашинным или электронным генератором (рис. 6.37).

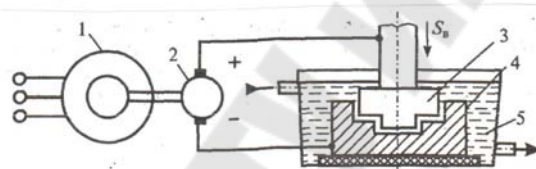


Рис. 6.37. Схема электроимпульсной обработки деталей

Применяют этот метод для предварительной обработки штампов, турбинных лопаток, изготовления фасонных отверстий в деталях из коррозионно-стойких и жаропрочных сплавов. **Электроимпульсную обработку** применяют для предварительной обработки заготовок.

**Высокочастотная электроискровая** обработка является разновидностью электроискровой, в которой используются электрические импульсы малой мощности с частотой 100...1500 кГц. Производительность метода в 30...50 раз выше электроискрового, обеспечивается более высокое качество поверхности, минимальная толщина дефектного слоя и незначительный износ инструмента. Применяется метод для обработки твердых и хрупких материалов. Процесс ведется при прямой полярности (рис. 6.39). Разрядный контур включается во вторичную цепь трансформатора. Разряд происходит при замыкании первичной цепи трансформатора прерывателем (вакуумной лампой или тиратроном).

**Электроконтактная обработка** основана на разрушении металла в результате механического и теплового воздействия в месте контакта электрода-инструмента с заготовкой, приводящего к размягчению или расплавлению, частичному испарению и удалению размягченного металла из зоны обработки (рис. 6.38).

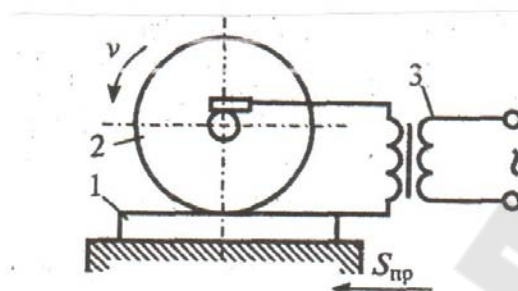


Рис. 6.38. Схема электроконтактной обработки

Электроконтактная обработка ведется на переменном или постоянном токе медными или чугунными электродами-инструментами. Скорость вращения инструментов составляет до 650 м/с. Источником теплоты в зоне обработки являются импульсные дуговые разряды. Метод не обеспечивает высокой точности и качества обработки поверхности, но обеспечивает высокую производительность (большой съем металла). Применяется он для резки заготовок, обдирки отливок, очистки от окалины, обработки криволинейных поверхностей и др.

### 6.12.2. Электрохимические методы обработки

В основе электрохимических методов обработки лежит *анодное растворение материала при электролизе*. При подаче постоянного электрического тока в зону обработки на поверхности заготовки (аноде) протекают химические реакции, переводящие металл в химические соединения. Продукты электролиза переходят в раствор и удаляются механическим путем. *Производительность процесса* зависит от электрохимических свойств электролита, плотности тока, состава и свойств обрабатываемого материала.

**Электрохимическое полирование** производят в ванне из растворов кислот или щелочей. Обрабатываемую заготовку подключают к аноду. В качестве катода используют пластину из меди, свинца или стали (рис.6.39 а). Электролит подогревают до 40...60°C. При подаче напряжения на электроды, начинается процесс растворения металла

заготовки анода на вершинах микронеровностей, т.к. в этой зоне выше электрический потенциал. В результате избирательного растворения микронеровности сглаживаются.

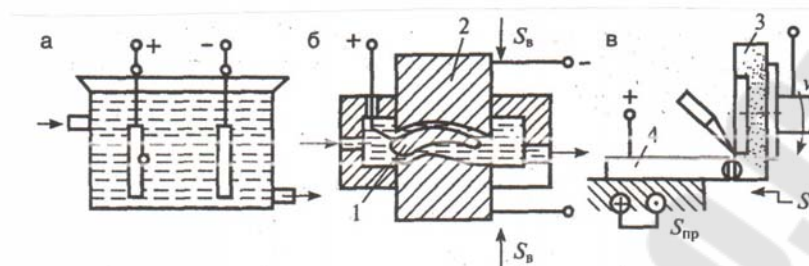


Рис. 6.39. Схемы электрохимической обработки: а – полирование; б – размерная обработка; в – электроабразивная обработка

**Электрохимическая размерная обработка** проводится с прокачкой под давлением электролита между заготовкой и инструментом (рис.6.39 б). При этом способе одновременно обрабатывается вся поверхность, находящаяся под катодом, что обеспечивает высокую производительность. Участки заготовки, не требующие обработки, изолируют. Формообразование происходит по методу копирования. Для электрохимической размерной обработки используют нейтральные электролиты (растворы  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

**При электроабразивной и электроалмазной обработках** инструментом-электродом служит шлифовальный круг из абразивного материала на электропроводящей связке (бакелитовая смола с графитовым наполнителем). Электролит подается в межэлектродный зазор между заготовкой (анодом) и инструментом (катодом). Продукты анодного растворения материала удаляются абразивными зёрнами. Шлифовальный круг совершает вращательное движение, а заготовка – движение подачи (рис. 6.40, в). За счет анодного растворения удаляется 85...90 % припуска, остальная часть – за счет механического воздействия. **При электроалмазной обработке** за счет механического воздействия удаляется около 25 % припуска. Эти методы применяют для обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов, а также нежестких заготовок, т.к. силы резания здесь незначительны.

**Анодно-механическая обработка** основана на сочетании электротермических и электромеханических процессов. В качестве инструментов используют металлические диски, ленты и проволоку (в зависимости от процесса), подключаемые к катоду. К аноду подключают-

ся заготовка. Обработку ведут в среде электролита (водный раствор жидкого натриевого стекла), который подается через сопло (рис. 6.40).

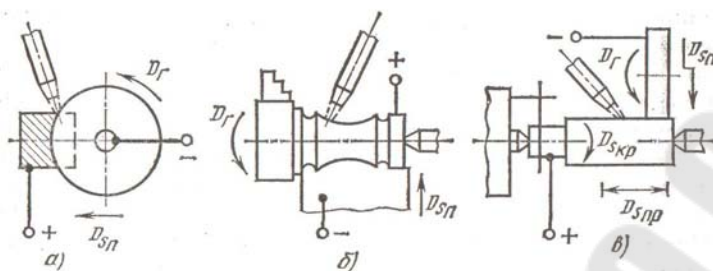


Рис. 6.40. Схемы анодно-механической обработки:

а – разделение заготовок на части и прорезание пазов; б – точение и в - шлифование осесимметричных поверхностей типа тел вращения

Заготовке и инструменту придаются те же движения, что и при обычной механической обработке. При пропускании через электролит тока происходит анодное растворение, как и при ЭХО. При соприкосновении инструмента с микронеровностями обрабатываемой поверхности происходит процесс *электроэрозии*, присущий электроискровой обработке. При больших плотностях тока в зоне обработки преобладает электроэрозионный процесс, а при малых – электрохимическое растворение. Этим методом обрабатываются все электропроводящие материалы: высокопрочные, вязкие и труднообрабатываемые металлы и сплавы (резка, прорезание пазов, щелей, обработка тел вращения и др.).

### 6.12.3. Ультразвуковая обработка

**Ультразвуковая обработка** основана на использовании энергии ультразвуковых колебаний инструмента, воздействующих на заготовку через абразивные частицы, твердость которых выше твердости обрабатываемого материала. Источниками энергии служат генератор ультразвуковой частоты 16...30 кГц 8 и источник постоянного тока 9. Рабочий инструмент 4 крепится к волноводу 5, соединенному с сердечником 7 магнитострикционного преобразователя, колеблющегося с амплитудой до 40...60 мкм. Обрабатываемую заготовку помещают в ванну 1 с абразивной суспензией 2, подаваемой под давлением (рис. 6.41). В качестве абразива используют карбиды бора и кремния, электрокорунд. Инструмент поджимают к заготовке 3 с усилием 1...60 Н. Частицы абразива, получив импульс движения от инстру-



мента, врезаются в обрабатываемую поверхность, скалывая с нее микрочастицы. Кавитационные явления в жидкости способствуют интенсивному перемешиванию абразивных зерен под инструментом, замене изношенных зерен новыми, а также разрушению обрабатываемого материала

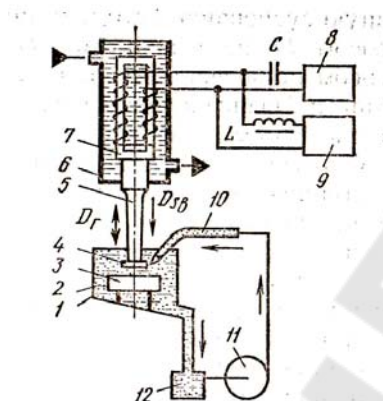


Рис. 6.41. Схема ультразвуковой обработки

Данный метод обработки используют для изготовления деталей сложной конфигурации, в том числе сквозных и глухих отверстий любой формы поперечного сечения, фасонных полостей, гравировки, резки, нарезания резьбы и др. Ультразвуковым методом можно обрабатывать хрупкие, твердые материалы: стекло, керамику, ферриты, кремниевые пластины, драгоценные камни, твердые сплавы, сплавы на основе титана, вольфрама и др. Движение подачи может быть вертикальным, продольным и комбинированным, в зависимости от выполняемых операций. Точность размеров и шероховатость обработанных поверхностей зависят от зернистости абразивных зерен и их природы. По качеству обработки они соответствуют таковым после шлифования. Пластичные и вязкие материалы этим методом не обрабатываются.

#### 6.12.4. Электронно-лучевая обработка

**Электронно-лучевая обработка** основана на превращении кинетической энергии направленного пучка электронов в тепловую энергию, под действием которой материал плавится и испаряется. В зоне обработки из-за высокой концентрации энергии температура достигает до  $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а на расстоянии  $1\text{ }\mu\text{м}$  от пятна фокусировки – не выше  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это обеспечивается за счет импульсной подачи пучка электронов. Длительность импульса всего  $10^{-4}\dots 10^{-6}\text{ с}$ . Этот метод позво-

ляет обрабатывать любые материалы, в том числе и труднообрабатываемые. Перспективно применение его при обработке малых отверстий (диаметром 1...10 мкм), прорезании тонких пазов, резки заготовок, изготовлении тонких пленок и сеток из фольги и др. Обработку производят на электровакуумных установках, называемых электронными пушками.

**Светолучевая обработка** основана на тепловом воздействии светового луча высокой энергии на поверхность обрабатываемой заготовки. В качестве источника светового излучения используют оптические квантовые генераторы – лазеры. Излучение лазера характеризуется высокой концентрацией энергии, которая излучается в миллионные доли секунды и сосредоточивается в луче диаметром около 0,01 мм. В фокусе диаметр луча составляет всего несколько микрометров, что обеспечивает температуру в зоне воздействия на металл до 6000...8000 °С. В результате этого материал мгновенно расплавляется и испаряется. Лазерную обработку применяют для прошивания сквозных отверстий, разрезания заготовки, раскроя листового материала, в том числе изготовления сложнопрофильных деталей и др. Обработке подвергаются заготовки из любых материалов, в том числе очень твердых и прочных. Работа лазера не сопровождается вредными излучениями и не требует применения вакуумных систем, что упрощает конструкцию технологического оборудования.

### **Резка водяной струей**

Резка осуществляется путем воздействия струи жидкости, исходящей из специального сопла с диаметром отверстия 0,08...0,5 мм со сверхзвуковой скоростью не менее 1000 м/с и, обеспечивающей рабочее давление на заготовку не менее 400 МПа. Резка осуществляется за счет высокого давления, возникающего на поверхности материала, находящегося в нескольких миллиметрах от сопла, превышающего предел прочности материала. Различают 2 вида процессов: гидрорезка и гидроабразивная резка. При *гидрорезке* в качестве рабочей среды используется только жидкость, а при *гидроабразивной* – в жидкость вводится дополнительно абразивный порошок (рис. 6.42). Введение абразива повышает технологические возможности процесса, позволяет резать твердые и труднообрабатываемые материалы значительной толщины. Данным методом можно резать практически

любые материалы (металлы, керамику, древесину, стекло, бумагу, резину и др.).

Для осуществления процесса гидроабразивной резки наиболее часто используются струйные головки со свободным вводом абразива в рабочую струю жидкости. Это позволяет не нарушать гидродинамические характеристики системы подачи рабочей жидкости и избежать проявлений абразивного изнашивания внутренних поверхностей рабочих органов оборудования.

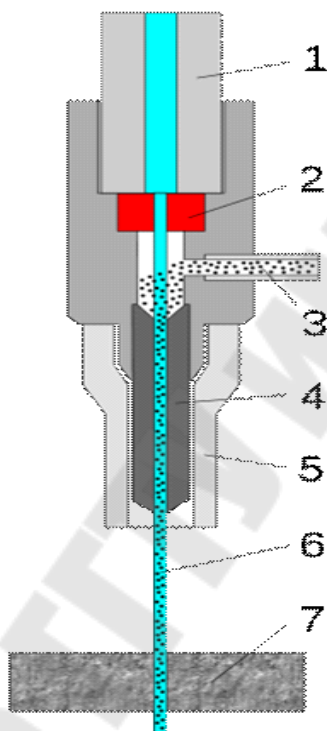


Рис. 6.42. Схема установки гидроабразивной резки. 1 – подвод воды под высоким давлением, 2 – сопло, 3 – подача абразива, 4 – смеситель, 5 – кожух, 6 – режущая струя, 7 – разрезаемый материал

Основными компонентами гидрорежущего оборудования являются: насос высокого давления, режущая головка, координатный стол и приводы перемещения режущей головки, система подачи рабочей жидкости и абразивного наполнителя, система числового программного управления и элементы гидравлической системы. Резку можно производить на расстоянии до 200 м от насоса, причем от одного насоса возможна работа одновременно нескольких головок. Насосная установка может размещаться на отдельном транспортном средстве,

например, на автомобиле, электрокаре, судоходном средстве и др. Рабочая среда в зону резки подается в этом случае по шлангам.

Формирование сверхзвуковой струи жидкости, являющейся режущим инструментом, осуществляется с помощью сопла, изготавливаемого обычно из искусственных камней, отличающихся высокой износостойкостью – сапфиров, алмазов, корунда и др. Стойкость сопла составляет 250...500 часов. В качестве абразивных порошков используют порошки твердых сплавов, карбидов, оксидов и др. твердых материалов. Для резки высоколегированных сталей и титановых сплавов используются порошки граната. При резке стекла используется кварцевый песок.

Резка водяной струей осуществляется без повышения температуры, при отсутствии источников нагрева и искрообразования, что обеспечивает безопасность процесса и отсутствие зоны термического влияния в разрезаемых материалах. Скорость резки зависит от угла наклона струи жидкости по отношению к обрабатываемой поверхности. Максимальная производительность достигается при расположении режущей струи перпендикулярно разрезаемой поверхности. Диаметр режущей струи составляет всего 0,4...0,5 мм, что обеспечивает минимальную ширину реза и хорошее качество обработанной поверхности ( $R_a = 0,5...1,5$  мкм). Данная технология позволяет воспроизводить сложные контуры, профили, скосы под любым углом.

Процесс является высокотехнологичным, не требующим переточки режущего инструмента, одним инструментом выполняются операции сверления и резания, резку можно начинать в любом месте без предварительного сверления отверстия. Гидроабразивная резка отличается высокой производительностью. Скорость резания нержавеющей сталей составляет при толщине листа 5 мм – 0,7...1,2 м/мин, при толщине 10 мм – 0,3...0,5 м/мин, при этом расход жидкости с абразивным наполнителем составляет 3...4 л/мин. Технологический процесс взрыво- и пожаробезопасен. Уровень шума составляет 85...95 дБ.

К недостаткам гидроабразивной резки следует отнести конструктивные трудности, возникающие при создании аппаратуры, обеспечивающей высокое давление режущей струи жидкости, низкую стойкость сопел и сложность их изготовления, высокую стоимость оборудования и высокую энергоемкость по сравнению с другими технологиями резки.



## Вопросы для самопроверки

1. Охарактеризуйте основные движения рабочих органов металлорежущего оборудования.
2. Охарактеризуйте основные параметры процессов резания.
3. Как классифицируются металлорежущие станки?
4. Какие операции можно производить на станках токарной группы?
5. Как крепится инструмент и заготовка на токарных станках?
6. Какие технологические операции можно выполнять на станках сверлильно-расточной группы?
7. Как производится крепление инструмента и заготовок на станках сверлильно-расточной группы?
8. Какие технологические операции можно выполнять на фрезерных станках?
9. Как производится крепление инструмента и заготовок на фрезерных станках?
10. Какие технологические операции можно выполнять на протяжных станках?
11. Какие методы получения фасонных профилей используются на зубообрабатывающих станках?
12. Приведите основные схемы обработки на плоскошлифовальных станках.
13. Приведите основные схемы обработки на круглошлифовальных станках.
14. Охарактеризуйте основные методы отделочной обработки поверхностей.
15. В чем заключается сущность электроэрозионной обработки?
16. В чем заключается сущность электроимпульсной обработки?
17. В чем заключается сущность электроконтактной обработки?
18. В чем заключается сущность электрохимической обработки?
19. В чем заключается сущность ультразвуковой обработки?
20. В чем заключается сущность светолучевой обработки?
21. Каковы особенности резки водяной струей?

## ГЛАВА 7. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПЛАСТМАСС

### 7.1. Общие сведения о пластмассах

**Пластмассами** называются материалы, основу которых составляют природные или синтетические высокомолекулярные соединения, способные при воздействии температуры и давления пластически деформироваться.

Основой большинства пластмасс являются синтетические полимеры. **Полимерами** называются вещества, молекулы которых состоят из многочисленных элементарных звеньев одинаковой структуры. Полимерные макромолекулы представляют собой длинные цепочки, состоящие из большого количества отдельных звеньев. *Поперечное сечение цепи составляет несколько нанометров, а длина – до нескольких тысяч нанометров, поэтому макромолекулам полимера свойственна большая гибкость.* Это одна из отличительных особенностей полимеров. Гибкость ограничена размерами сегментов – жестких участков цепей, состоящих из нескольких звеньев.

Атомы, входящие в основную цепь полимера, связаны между собой прочной химической (ковалентной) связью, например, для связи С-С составляющей 330 кДж/моль. Силы межмолекулярного взаимодействия, имеющие обычно физическую природу), в 10...50 раз слабее. Однако в реальных полимерах они имеют большую суммарную величину вследствие значительной протяженности макромолекул. Таким образом, *полимеры характеризуются прочными связями вдоль цепи макромолекул и относительно слабыми в поперечном направлении (за исключением пространственно сшитых полимеров).* Это вторая отличительная особенность полимеров.

**По форме макромолекул** полимеры подразделяются на: линейные, разветвленные, лестничные и пространственные или сетчатые (рис. 7.1).

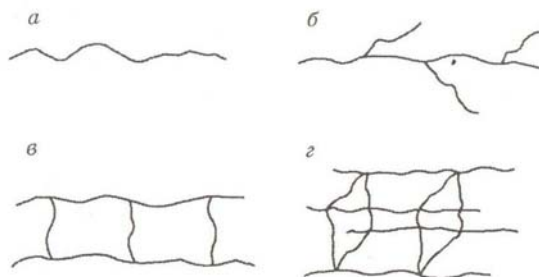


Рис. 7.1. Формы макромолекул полимеров

а - линейная; б – разветвленная; в – лестничная; г – сетчатая

*Линейные макромолекулы* полимера представляют собой длинные зигзагообразные или закрученные в спирали цепочки. Гибкие макромолекулы с высокой прочностью вдоль цепи и слабыми межмолекулярными связями обеспечивают эластичность материала, способность его размягчаться при нагревании, а при охлаждении вновь затвердевать. Линейные полимеры широко используются для получения пленок и волокон.

*Разветвленные макромолекулы* имеют боковые ответвления, которые препятствуют сближению макромолекул и их плотной упаковке. Такие материалы имеют пониженное межмолекулярное взаимодействие, ниже прочность, повышенную плавкость и растворимость.

*Макромолекулы лестничных* полимеров состоят из двух цепей, соединенных между собой поперечными химическими связями. Они, как правило, имеют более жесткую основную цепь, обладают повышенной теплостойкостью, практически нерастворимы в обычных растворителях.

*Пространственные или сетчатые* полимеры образуются при соединении (сшивке) макромолекул между собой в поперечном направлении прочными химическими связями. В результате образуется сетчатая структура с разной плотностью сетки. Редкосетчатые полимеры теряют способность растворяться и плавиться, однако обладают определенной упругостью (мягкие резины). Густосетчатые отличаются повышенными твердостью и теплостойкостью, нерастворимостью, например, отвержденные феноло-формальдегидные смолы. Пространственные густосетчатые полимеры составляют основу большинства конструкционных пластмасс.

***В зависимости от расположения и взаимосвязи макромолекул*** полимеры могут находиться в аморфном или кристаллическом состояниях. Для аморфных полимеров характерен ближний порядок, который соблюдается на расстояниях соизмеримых с длиной молекул. Эти полимеры однофазны. Аморфные состояния характерны для полимеров с нерегулярной структурой (сетчатые, разветвленные и др.). Для полимеров регулярного строения с достаточно гибкими макромолекулами характерно наличие кристаллических областей, обладающих трехмерным дальним порядком в расположении атомов и молекул, который соблюдается на расстояниях, превышающих в сотни раз размеры молекул. Кристалличность придает полимеру повышенную теплостойкость, прочность и жесткость. К кристаллизующимся полимерам относятся полиэтилен, полипропилен, полиамид и др.

**В зависимости от температуры** полимеры могут находиться в *трех физических состояниях*: стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем. В *стеклообразном* состоянии полимеры деформируются также как и обычные упругие твердые тела. Они испытывают только упругую деформацию, которая может достигать до 5%. Атомы совершают лишь колебательные движения около положения равновесия, перемещение звеньев и макромолекул отсутствует. При деформировании полимера, находящегося в *высокоэластическом* состоянии к упругим деформациям добавляется высокоэластическая составляющая, которая может достигать до 1000%. Наблюдается колебательное движение звеньев, молекула приобретает возможность изгибаться. При температуре выше температуры текучести материал переходит в *вязкотекучее* состояние, при котором характерно перемещение всех макромолекул относительно друг друга (рис. 7.2).

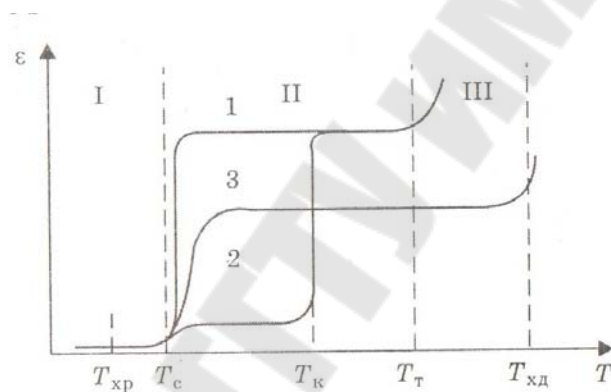


Рис. 7.2. Термомеханические кривые:  
 1 — для аморфного и 2 — кристаллического термопластов;  
 3 — реактопласта

**По отношению к нагреву** полимеры подразделяются на термопластичные и терморезистивные. К *термопластичным* относятся полимеры, которые при нагревании переходят из твердого агрегатного состояния в вязкотекучее, а при охлаждении вновь затвердевают. Это свойство они сохраняют при многократных нагревах. К ним относятся полимеры с линейной и разветвленной структурой макромолекул.

**Терморезистивные** полимеры при нагреве до определенных температур или при взаимодействии со специальными отвердителями (сшивающими агентами) образуют пространственную сетчатую структуру и при повторном нагреве вплоть до температуры химической деструкции не переходят в вязкотекучее состояние. Термопластичные материалы удобны в переработке, имеют усадку в пре-

делах 1...3 %, обладают большой упругостью и малой хрупкостью. Термореактивные полимеры после отверждения хрупки, имеют усадку до 10...15 % и в ненаполненном виде практически не применяются, а используются в качестве связующих в композиционных материалах.

**Композиционные материалы** (композиты) представляют собой гетерофазные системы, состоящие из двух и более разнородных компонентов, имеющих границы раздела между ними. Компонент, непрерывный по всему объему материала, обеспечивающий его монолитность, называется матрицей или связующим. Свойства связующего во многом обуславливают физико-механические и технологические свойства композита. По типу матрицы различают композиционные материалы на полимерной, металлической и керамической основе.

В данном разделе рассматриваются материалы на полимерной основе, содержание связующего в которых достигает до 30...70 %. Помимо связующих в их состав вводят наполнители, пластификаторы, стабилизаторы, красители, сшивающие агенты, отвердители и другие функциональные добавки.

## **7.2. Технологические методы изготовления изделий из пластмасс**

В большинстве случаев изделия из пластмасс производятся при нахождении их в вязкотекучем состоянии способами прямого и литьевого прессования, литья под давлением, центробежного литья, экструзии и др.

### **7.2.1. Прямое прессование**

Прямое прессование заключается в формовании изделия путем загрузки материала в виде порошка, гранул или таблеток непосредственно в формообразующую полость пресс-формы, где он нагревается за счет теплоты, передаваемой через стенки пресс-формы или от обогреваемых плит, и формовании изделия под воздействием давления при смыкании пуансона и матрицы. При одностороннем прессовании обычно матрица неподвижна (рис. 7.3).

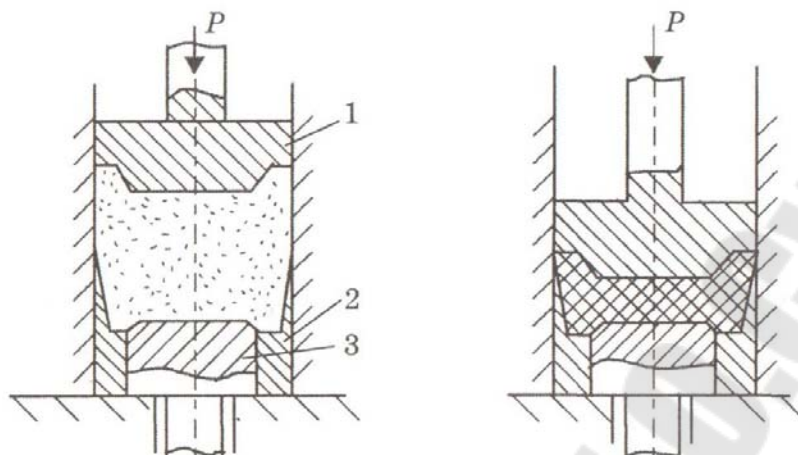


Рис. 7.3. Схема изготовления детали методом прямого прессования:  
1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – толкатель

Цикл изготовления детали состоит из загрузки материала в пресс-форму, формообразующая полость которой соответствует конфигурации детали, формования, выдержки для отверждения материала и извлечения изделия из пресс-формы. Методом прямого прессования перерабатываются в основном термореактивные пластмассы, но возможна переработка практически любых пластмасс. При прессовании реактопластов, выделяющих большое количество летучих продуктов, производят одну или несколько подпрессовок, заключающихся в размыкании пресс-форм на высоту 10...30 мм на 2...6 с, в зависимости от габаритов детали.

Пресс-материалы могут представлять собой порошкообразные, волокнистые или слоистые композиции. С целью снижения размеров загрузочной камеры пресс-формы порошкообразные и волокнистые материалы предварительно таблетуют в специальных пресс-формах в таблетки цилиндрической формы или формы, близкой к конфигурации детали. Таблетирование производят при давлении 40...200 МПа без подогрева или с подогревом до 90...100 °С.

Длительность нахождения материала в пресс-форме зависит от природы полимерного связующего, размеров детали и определяется временем, необходимым для сквозного прогрева материала и отверждения связующего. Ввиду низкой теплопроводности пластмасс рекомендуется предварительный подогрев пресс-материала до температуры 80...120 °С, а иногда и до 160...200 °С. В массовом производстве подогрев обычно производят токами высокой частоты (10...20 МГц), что позволяет в короткое время прогреть равномерно по толщине большую массу материала, сократить технологический цикл



в 2...3 раза и значительно повысить текучесть материала при формообразовании детали.

Метод прямого прессования наиболее прост, однако имеет ряд существенных недостатков. В частности, он не позволяет получать тонкостенные изделия, а также детали сложной конфигурации, предъявляет повышенные требования к точности размеров формирующих элементов и др.

### 7.2.2. Литьевое прессование

При литьевом прессовании перерабатываемый материал загружают в обогреваемую камеру, смонтированную на предварительно замкнутой пресс-форме. После нагрева пресс-массы до температуры перехода в вязкотекучее состояние материала под давлением пуансона через литниковую систему 6 подается в формирующую полость пресс-формы (рис. 7.4). Давление прессования составляет 150...200 МПа. После отверждения массы деталь извлекается из формы. Длительность цикла изготовления от типа перерабатываемого материала. По данной технологии можно перерабатывать как реактопласты, так и термопласты. Достоинством этого метода является возможность получения тонкостенных деталей сложной конфигурации с достаточной точностью их геометрических размеров, в том числе с резьбой.

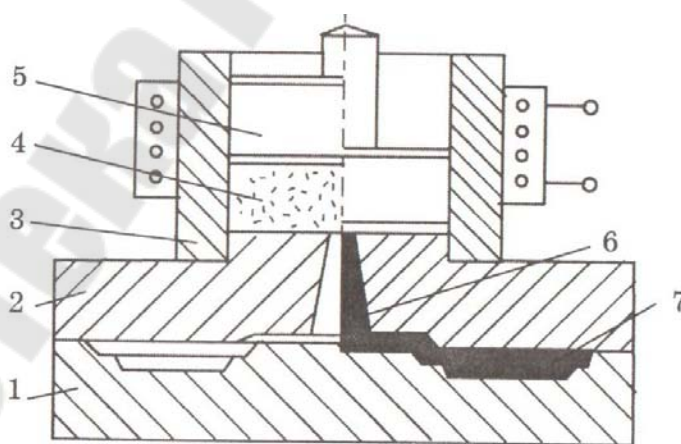


Рис. 7.4. Схема литьевого прессования:

- 1, 2 – нижняя и верхняя половины формы; 3 – обогреваемая камера;  
4 – материал; 5 – пуансон; 6 – литник; 7 – формирующая полость

При литьевом прессовании отпадает необходимость в подпрессовках, так как образующиеся газы удаляются между матрицей и лит-

никовой плитой. Однако несколько сложнее литьевая оснастка, чем при прямом прессовании и происходит потеря материала в литниковых каналах и на пресс-остаток в загрузочной камере.

### 7.2.3. Литье под давлением

Литьем под давлением изготавливаются в основном детали из термопластичных материалов. Метод переработки наиболее производительный, легко поддающийся автоматизации. Изделия получают путем впрыска под давлением расплава пластмассы в литьевую форму, полость которой соответствует форме и геометрическим размерам готовой детали с учетом усадки материала при отверждении (рис. 7.5).

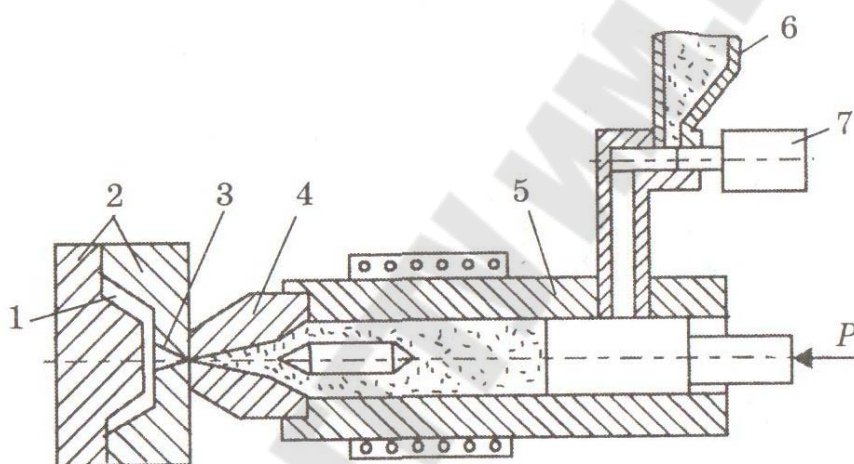


Рис. 7.5. Схема изготовления детали из термопласта литьем под давлением

Материал в виде гранул загружается в приемный бункер 6 литьевой машины, из которого с помощью дозирующего устройства 7 поступает в обогреваемый цилиндр 5, где осуществляется его прогрев и пластикация. Под давлением 80...250 МПа расплавленный материал впрыскивается через мундштук машины 4 и литниковый канал 3 литьевой формы 2 в формующую полость 1. Форма выдерживается в замкнутом состоянии до полного отверждения материала, затем размыкается и с помощью системы выталкивания готовая деталь извлекается из формы. При изготовлении крупногабаритных изделий обычно литьевая форма с целью сокращения технологического цикла охлаждается водой.

Технологические режимы переработки (давление впрыска, температура литья, температура литьевой формы, время выдержки в



форме) зависят от типа перерабатываемого материала. Нижний предел температуры литья определяется температурой перехода материала в вязкотекучее состояние, а верхний – температурой химической деструкции (разложения) полимера. Температурный диапазон переработки термопластов находится в пределах 120...350 °С. В зависимости от размеров деталей и типа полимера формы могут нагреваться до 25...110 °С. Время выдержки под давлением также выбирается исходя из этих же факторов и может составлять от нескольких секунд до минуты, чтобы обеспечить полное отверждение всей массы детали и исключить образование утяжин и впадин.

Литье может производиться как в одноместные, так и в многоместные формы, что определяется геометрическими размерами и массой деталей, а также возможностями литьевой машины. Производительность изготовления деталей литьем под давлением в 20...40 раз выше чем при прессовании.

Литье под давлением реактопластов на стадиях пластикации и впрыска формовочной массы в литьевую форму аналогично литью термопластов. Однако расплавы термопластов могут длительно находиться в камере пластикации, а время нахождения реактопластов весьма ограничено, поскольку при нагревании происходит процесс отверждения массы и снижение ее вязкопластических свойств. Кроме того литье термопластов производят в слегка подогретую форму, а реактопластов – необходимо производить в форму, нагретую до температуры переработки материала.

К недостаткам процесса литья под давлением относятся значительные внутренние напряжения, связанные с неравномерностью охлаждения материала по всему объему детали, ориентация макромолекул в направлении течения материала при заполнении формы и его охлаждении, а также возможность образования мест «холодного спая» при неудачной конструкции литниковой системы.

Литье под давлением реактопластов может производиться на плунжерных машинах со шнековой пластикацией. В плунжерных машинах пластикация осуществляется только в результате прогрева. При литье с червячной пластикацией материал захватывается из бункера вращающимся червяком и перемещается по винтовому каналу вдоль цилиндра к соплу (рис. 7.6). При перемещении по винтовому каналу происходит перемешивание материала, уплотнение его и равномерный нагрев, как за счет внешних источников теплоты, так и за счет трения и сдвиговых усилий в канале червяка.

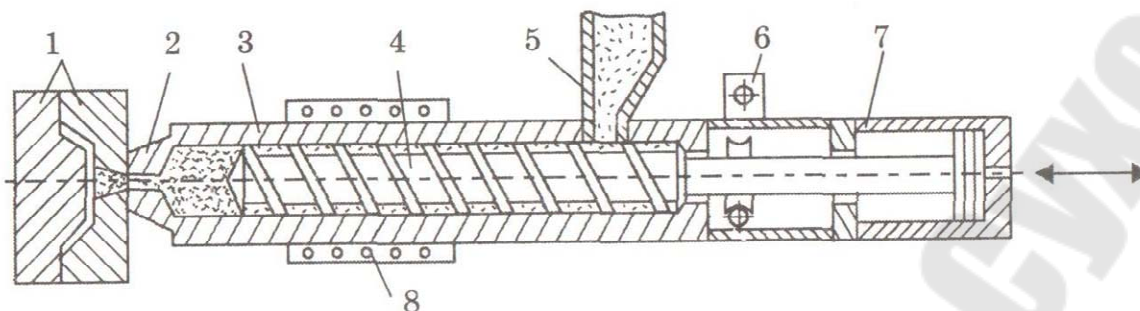


Рис. 7.6. Схема литья под давлением реактопластов со шнековой пластикацией:

1 – форма; 2 – сопло; 3 – рабочий цилиндр; 4 – червяк;  
5 – бункер; 6 – привод; 7 – гидроцилиндр; 8 – обогреватели

При пластикации вращающийся червяк 4 под действием накапливающегося в передней части цилиндра материала отходит назад на расстояние, определяемое необходимой порцией для впрыска, что регулируется концевым выключателем. Впрыск материала в закрытую форму 1 осуществляется при поступательном перемещении червяка под действием гидроцилиндра 7. После заполнения формы производится выдержка под давлением, несколько пониженном по сравнению с давлением впрыска, при одновременной подготовке сырья для следующей отливки. После отвердения детали форма размыкается и изделие извлекается из нее. Имеются литьевые машины с отдельными цилиндрами пластикации и инъекции.

Термопластичные материалы перерабатываются литьем под давлением и на роторных литьевых машинах. Для литья двухцветных изделий из термопластов применяют литьевые машины с двумя инъекционными цилиндрами с последовательным или одновременным впрыском.

#### 7.2.4. Центробежное литье

Центробежное литье применяют для изготовления толстостенных изделий из термопластов. Процесс осуществляют на установках с вертикальной или горизонтальной осью вращения формирующей матрицы. Расплавленная масса заливается в форму, которая вращается с частотой до 800...3000 об/мин. Механизм образования отливки аналогичен как и при изготовлении отливок из металла. Как и при литье

под давлением производится подогрев матрицы до определенной температуры в зависимости от типа перерабатываемого материала.

### 7.2.5. Экструзия

Методом экструзии изготавливают из термопластичных полимеров различные фасонные изделия, длина которых во много раз превосходит размеры поперечного сечения (длинномерные изделия типа труб, шлангов, полос, пленок и др.). Суть метода заключается в продавливании пластичной массы под высоким давлением через формирующую головку. Перемещение порошка или гранул в экструдере, создание давления, пластикация и перемешивание материала в цилиндре осуществляется с помощью шнеков (рис. 7.7).

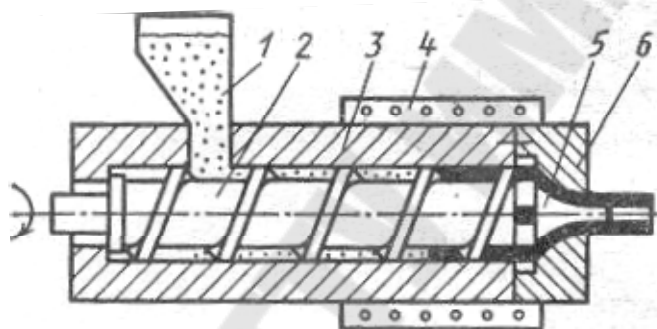


Рис. 7.7. Схема экструдера для непрерывного выдавливания профиля: 1 – бункер; 2 – шнек; 3 – обогреваемый цилиндр; 4 – червяк; 5 – оправка с радиальными каналами; 6 – профилирующая головка

Материал после предварительной сушки загружается в бункер. С помощью шнека, вращающегося с частотой до 1000 об/мин, масса передвигается вдоль обогреваемого цилиндра к головке с мундштуком, имеющим отверстия необходимого профиля. По мере продвижения материала в цилиндре происходит его разогрев до пластического состояния как за счет нагревательных элементов, расположенных на цилиндре, так и за счет трения о стенки шнека и между соседними частицами при перемешивании.

Для уплотнения материала по мере продвижения к мундштуку и создания необходимого давления шнек изготавливается с переменным шагом, уменьшающимся по ходу перемещения, или с переменным живым сечением, уменьшающимся в том же направлении. Вы-

давливаемый профильный материал охлаждают и разрезают на мерные части или сворачивают в рулон.

При изготовлении полых длинномерных изделий, например, труб, формирование внутреннего диаметра осуществляется в экструзионной головке с помощью дорна (рис. 7.8), а внешнего – калибрующим мундштуком.

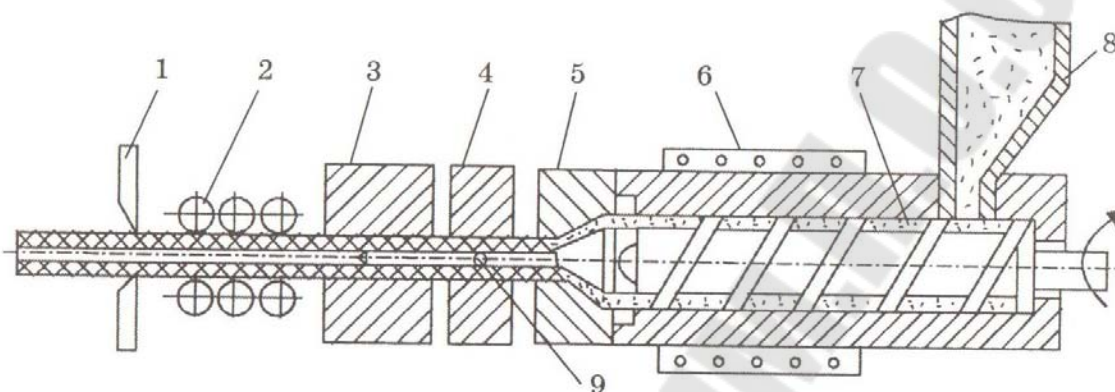


Рис. 7.8. Схема получения труб методом непрерывного выдавливания: 1 – обрезной механизм; 2 – транспортер; 3 – охлаждающее устройство; 4 – калибрующий мундштук; 5 – экструзионная головка; 6 – нагревательные элементы; 7 – рабочий цилиндр; 8 – загрузочный бункер; 9 – дорн

Для изготовления труб большого диаметра (600...2500 мм) экономически более выгодно использовать экструзионно-обмоточную технологию, согласно которой из экструдера выходит гладкая или профилированная лента, которая по спирали наматывается на обогреваемый цилиндр, движущийся поступательно и вращающийся вокруг своей оси. В области соединения лент внахлест материал сваривается.

Тонкую пленку получают путем раздува горячей цилиндрической заготовки, поступающей из экструдера или щелевой головки (рис. 7.9). Внутри трубчатой заготовки, выдавливаемой из угловой головки экструдера, под определенным давлением жатый воздух, деформирующий ее во всех направлениях до определенной толщины. Происходит отверждение пленки и далее с помощью специального валкового устройства пленка наматывается на приемный барабан.

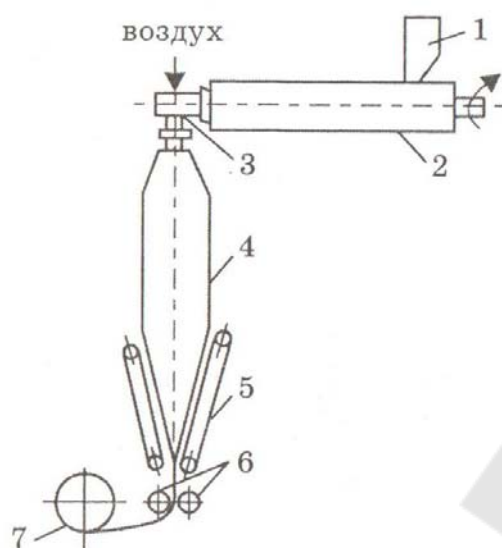


Рис. 7.9. Схема получения пленки методом раздува:  
 1 – загрузочный бункер; 2 – экструдер; 3 – угловая головка;  
 4 – пленка; 5 – бесконечные ленты; 6 – обжимные валки;  
 – приемный барабан

Для производства многослойных пленок или листов применяют метод соэкструзии. В этих случаях используют двухшнековый экструдер с одной общей рабочей головкой. Каждый из шнеков питается из своего бункера с определенной композицией, а из головки выходит слоистый экструдат. Методом экструзии возможно также получение армированной пленки.

Метод экструзионно-раздувного формования эффективен при изготовлении емкостей (бутылок, фляг, канистр) из пластичных материалов. Процесс осуществляется в две стадии: на первой – изготавливается трубчатая заготовка, на второй – под действием давления воздуха в пресс-форме формуется изделие (рис. 7.10). Гранулированный или порошкообразный материал пластифицируется в экструдере и выдавливается через профилирующую головку, формируя трубчатую заготовку нужной длины. При смыкании обеих половин формы верхний конец заготовки зажимается и сваривается. Герметизированную заготовку раздувают сжатым воздухом под давлением  $0,2 \dots 1,0$  МПа, подаваемым через дорн формующей головки. Происходит раздувание заготовки с одновременным уменьшением толщины стенки. После охлаждения готовое изделие извлекается из формы.



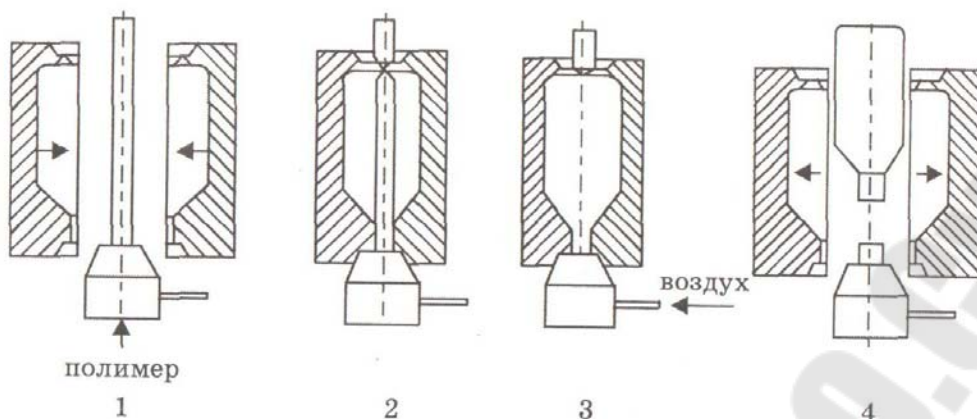


Рис. 7.10. Схема изготовления пластмассовых сосудов методом экструзионного раздува: 1 – экструзия трубчатой заготовки; 2 – сдавливание дна; 3 – раздувание сосуда; 4 – выдувание изделия

### 7.2.6. Формование изделий из листовых материалов

Детали сложной формы из листовых термопластичных материалов могут изготавливаться методами штамповки, пневмо- и вакуумформования.

При формировании изделий в штампе жестким пуансоном сначала вырезают заготовку определенного размера 3 и разогревают ее до пластического состояния. Затем укладывают ее в матрицу 5 и деформируют

пуансоном 2. Изделие выдерживается в штампе под давлением и охлаждается до потери пластичности (рис. 7.11б). Формирование деталей с большой степенью вытяжки производят жестким пуансоном с протяжным кольцом (рис. 7.11а). Разогретую заготовку размещают на протяжном кольце 4.

Для исключения образования гофров прижимают прижимным кольцом 2 и деформируют пуансоном 1. Этим методом изготавливают детали из полиметилметакрилата (оргстекла), винипласта и др.

Для получения изделий сравнительно большого размера из термопластов используют методы пневмо- и вакуумформования (рис. 7.12).

При пневмоформовании разогретая до пластического состояния заготовка 3 располагается между двумя половинами герметичной формы, нижняя половина которой имеет рельеф, соответствующий форме детали. Под воздействием давления, создаваемого в верхней половине формы, лист прогибается, плотно огибая нижнюю часть формы, приобретая соответствующий рельеф (рис. 7.12а).

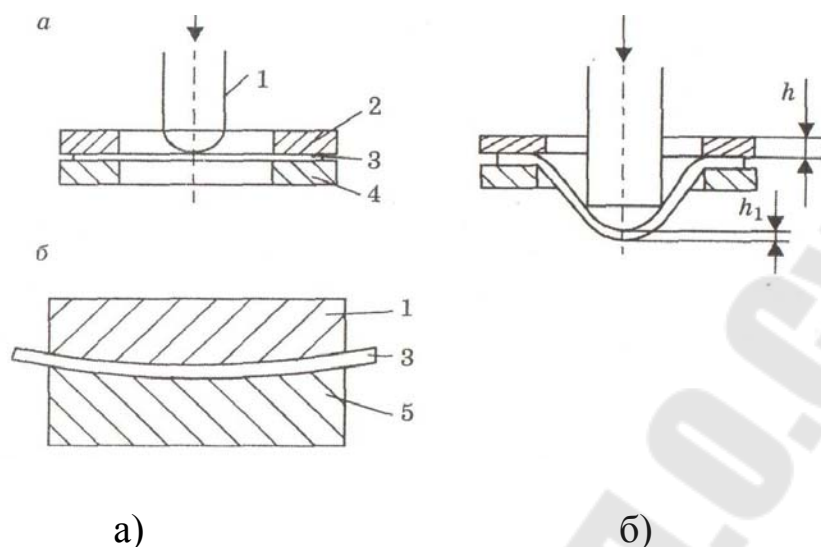


Рис. 7.11. Схема формирования листовых материалов с протяжным кольцом (а) и жестким пуансоном (б)

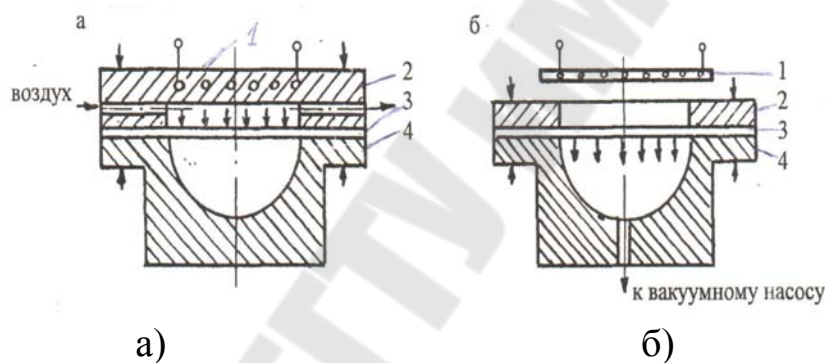


Рис. 7.12. Схема пневмо (а) – и вакуумформования (б):

1 – нагревательный элемент; 2 – верхняя полуформа;  
3 – заготовка; 4 – нижняя полуформа

При вакуумформовании вместо давления в верхней части формы, как это делалось в предыдущем случае, создается разрежение в нижней части формы, в результате чего лист плотно облегает ее (рис. 7.12б). Возможно применение нагрева заготовки непосредственно в форме.

Изготовление деталей вырубкой производится в специальных штампах, пуансоны которых выполнены в виде контурного ножа. Во избежание растрескивания деталей процесс ведут при температуре выше температуры стеклования обрабатываемого материала. В вырубных штампах необходимо обеспечить зазор между пуансоном и матрицей не более 0,01...0,05 мм. Необходимо исключать прямые, тупые и острые углы по контуру, закругляя их. Минимальное значе-

ние радиуса закругления при угле сопряжения до  $90^\circ\text{C}$  выбирается из условия  $R > 0,5t$ , где  $t$  – толщина материала заготовки, а при больших углах –  $R > 0,25t$ . Минимальный диаметр пробиваемого круглого отверстия допускается не менее  $0,4t$ , а квадратного со стороной не менее  $0,45t$ . Расстояния от края детали до отверстия и между ними должны быть не менее  $0,8 \dots 1,5t$ .

Предельная толщина материала при вырубке деталей из гетинакса составляет 8 мм, из текстолита 6,5 мм. Без предварительного подогрева можно вырубать детали толщиной до  $1,5 \dots 2,0$  мм. Предварительный подогрев производят в термошкафах или на подогреваемых столах, расположенных возле вырубных прессов, из расчета  $5 \dots 8$  мин на 1 мм толщины листа.

### **7.2.7. Изготовление деталей из композиций холодного отверждения**

Применяются в основном следующие способы: свободная заливка, контактное формование, напыление, намотка на вращающуюся оправку.

*При свободной заливке* изделия получают в открытых или закрытых формах, имеющих литниковые отверстия. Этим способом можно изготовить детали из пластмасс, обладающих высокой жидкотекучестью (на основе эпоксидных, акриловых и полиэфирных смол). Формы изготавливают из гипса, цемента, формопласта и др. Для предотвращения прилипания полимерного материала к форме формирующие поверхности обрабатываются антиадгезионными составами.

*Контактное формование* применяют для изготовления крупногабаритных изделий, таких как корпусные детали, кузовные элементы автомобилей, футеровка емкостей и др. На модель или форму наносят разделительный слой для легкого съема изделия. Затем наносят слой связующего и пропитанную связующим стеклоткань. Производится прикатка резиновым валиком, смоченным пластификатором для удаления пузырьков воздуха и уплотнения материала (рис. 7.13).



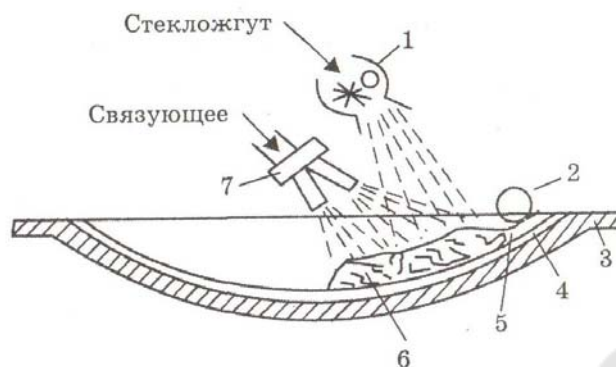


Рис. 7.13. Схема контактного формования стеклопластиков:  
 1 – форма; 2 – разделительный слой; 3 – отформованное изделие после прикатки; 4 – прикатной ролик; 5 – формируемый материал

После подсушки в течение 2...4 ч наносят следующий слой связующего и стеклоткани и так до получения необходимой толщины изделия.

Суть метода получения изделий путем напыления заключается в нанесении на поверхность формы рубленого волокна и связующего. В качестве связующего чаще всего используют полиэфирные смолы. Процесс осуществляется с помощью специального пистолета, имеющего три сопла: два для подачи связующего и одно для подачи рубленого волокна.

Дискретное волокно получают в специальном устройстве, расположенном перед соплом, куда поступает стекложгут. Через крайние сопла на поверхность направляется смола, а через среднее (с помощью воздушного потока) рубленое стекловолокно длиной 10...100 мм. Кусочки стекловолокна, попадая в поток смолы, смачиваются ею и направляются на поверхность модели, образуя слой необходимой толщины. Производится уплотнение резиновым валиком, смоченным дибутилфталатом. Метод более

производителен по сравнению с предыдущим, однако он имеет и свои недостатки: затруднено изготовление изделий сложной конфигурации, потери стекловолокна составляют до 5 %, требуется повышенное внимание к условиям труда рабочего персонала.

Для изделий оболочкового типа, имеющих форму тел вращения, применяется *метод намотки*, позволяющий создавать ориентированную структуру наполнителя в изделии с учетом его формы и особенностей эксплуатации. Суть метода заключается в намотке армирующей

щей нити или жгута, пропитанного связующим, на вращающуюся оправку (рис. 7.14).

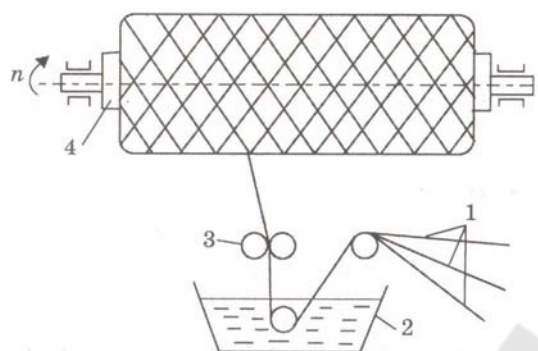


Рис. 7. 14. Схема изготовления изделия из стеклопластика намоткой: 1 – стекложгут; 2 – пропиточная ванна; 3 –отжимные ролики; 4 – оправка

Применяют «сухую» и «мокрую» намотки. «Сухая» производится предварительно пропитанными и высушенными волокнами, «мокрая» - волокном, пропускаемым через ванну со связующим непосредственно при намотке.

Сочетание намотки с другими методами позволяет изготавливать изделия с необходимым комплексом свойств, например, бипластмассовые трубы, в которых наружный слой из стеклопластика несет силовую нагрузку, а внутренний из поливинилхлорида обеспечивает высокую химическую стойкость.

### 7.2.8. Особенности конструктивного оформления деталей из пластмасс

При конструировании деталей из пластмасс необходимо учитывать специфику физико-механических и технологических свойств пластмасс. Следует стремиться к упрощению конструкции детали как по технологическим, эксплуатационным, так и экономическим соображениям. При литьевом прессовании масса детали не должна превышать 20 кг и вписываться в габаритные размеры пресса. При литье под давлением необходимо учитывать возможности литьевого оборудования.

Для облегчения извлечения деталей из пресс-формы они должны иметь технологические уклоны. В деталях необходимо избегать

поднутрений, острых углов, разнотолщинности стенок. Конфигурация детали не должна препятствовать течению материала при заполнении формы. Технологические уклоны назначают на вертикальных внешних и внутренних поверхностях параллельно усилию замыкания пресс-формы или совпадающих с направлением извлечения из детали подвижных формующих элементов пресс-формы (рис. 7.15).

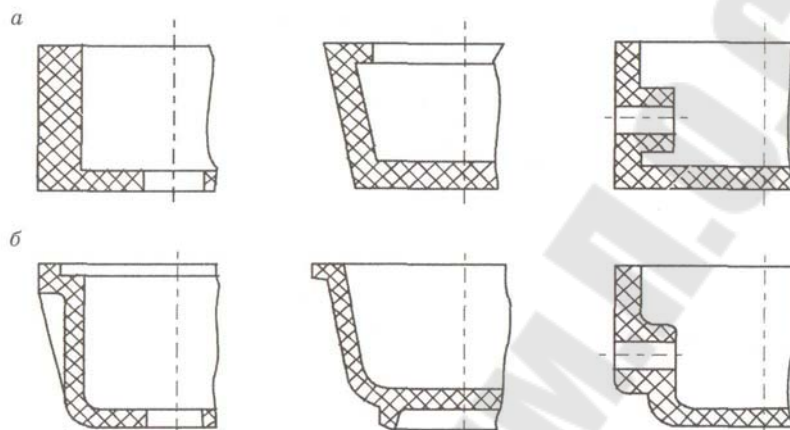


Рис. 7.15. Примеры конструктивного оформления пластмассовых деталей: а – нетехнологично; б – технологично

С целью увеличения жесткости и прочности изделия торцовые поверхности полых деталей желательно выполнять в виде буртиков толщиной до 1,5...2,0 толщин стенки по всему контуру.

Резьбовые поверхности в деталях можно оформлять в процессе формования, механической обработкой или путем введения в деталь металлических резьбовых вставок. Наименьший размер резьбы, получаемой прессованием в порошковых композитах – М3, а волокнистых – М4, с шагом не менее 0,7 мм. Для повышения прочности и жесткости в том или ином направлении, монтажа различных крепежных изделий, введения в диэлектрические композиты электропроводных элементов используют различные виды армирования. На армирующих элементах, вводимых в деталь в процессе формования, на ее наружных поверхностях делают различные проточки, рифления, многогранники и т.д., предотвращающие возможность смещения элементов в осевом направлении или по образующей. В случае крепления плоской арматуры на закрепляемой в пластмассе части делают различные высечки или загибы (рис. 7.16).

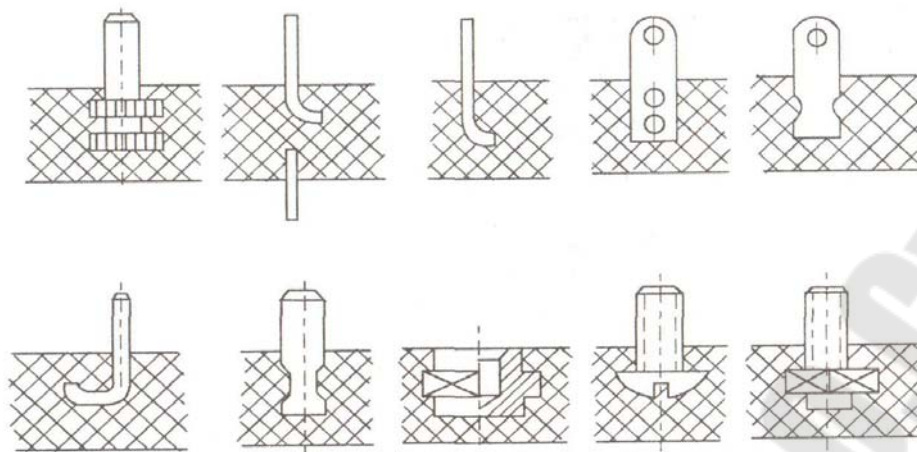


Рис. 7.16. Варианты крепления арматуры в пластмассовых деталях

### 7.3. Изготовление изделий из резин

Резинами называются продукты вулканизации смеси каучука и серы с различными ингредиентами, обладающие высокими эластическими свойствами в широком диапазоне температур. Благодаря их малой сжимаемости, релаксационному характеру деформаций, высокой стойкости к истиранию, газо-водонепроницаемости, химической стойкости, электроизолирующим свойствам и небольшой плотности резины получили широкое применение для изготовления амортизирующих деталей, уплотнений, для герметизации, химической защиты деталей машин, для изготовления электроизоляционных изделий, транспортерных лент и др.

Основой всякой резины является каучук натуральный или синтетический, который обеспечивает пластичность исходной резиновой смеси (сырой резины) и во многом определяет основные физико-механические свойства резинового материала. Кроме каучука в резины вводят вулканизирующие агенты (чаще всего серу), наполнители, пластификаторы, противостарители и др. функциональные добавки.

Весь цикл изготовления резиновых деталей включает следующие операции: подготовку ингредиентов, дозирование, смешение, приготовление полуфабриката (придание резиновой смеси формы, удобной для дальнейшей переработки) формование и вулканизацию.

Приготовление резиновых смесей является начальной и самой трудоемкой стадией технологического процесса.

На стадии подготовки ингредиентов резиновой смеси каучуки нарезают на куски и подвергают декристаллизации и пластикации.

Порошкообразные наполнители подвергают сушке, контрольному просеиванию и дозированию. Смешение подготовленной в соответствии с рецептурой массы осуществляется в резиносмесителях и на вальцах, что обеспечивает равномерное распределение ингредиентов в каучуке. При смешении в закрытых смесителях происходит разогрев смеси до 90...100 °С, поэтому на этой стадии серу не вводят, во избежание вулканизации. Сера вводится в смесь при последующем вальцевании и ее листовании.

Для получения листовой сырой резины определенной толщины резиновая смесь пропускается между нагретыми валками каландров. Обычно получают листы сырой резины толщиной 0,3...1,0 мм, которые сматываются в рулоны с промежуточной тканевой прослойкой во избежание слипания слоев. Из сырой резины в дальнейшем формируют различные резинотехнические изделия, которые вулканизируются при температуре 140...145 °С.

На участке каландрирования выполняют также пропитку и промазывание тканевых наполнителей. Прорезинивание тканей осуществляется на двух- трехвалковых промазочных каландрах, на которые подаются предварительно подогретая резиновая смесь в виде тонкого листа и ткань, провальцовываемые совместно. При необходимости соединения двух и более каландрированных листов резины или слоев прорезиненной ткани в одну пластину большей толщины либо их соединения в различных сочетаниях производят дублирование на специальных каландрах (рис. 7.17).

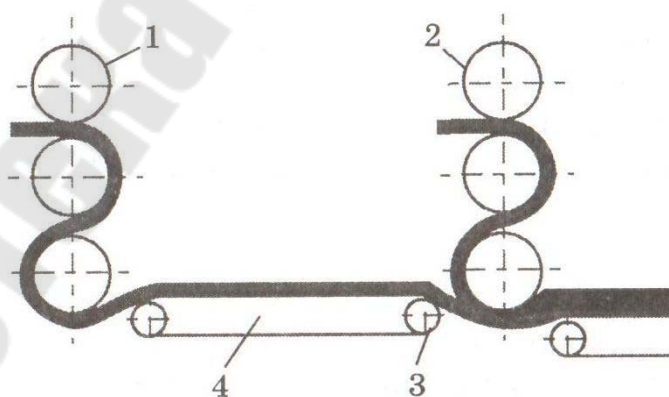


Рис. 7.17.Схема дублировочных каландров:  
1, 2 – каландры; 3 – барабан; 4 - транспортер



В зависимости от выпускаемых изделий далее изготавливаются соответствующие заготовки путем профилирования (для шнуров, трубок, рукавов, прокладок и т.д.), формования (заготовки для формовых изделий), литья под давлением (для изделий значительных габаритов и сложных очертаний), резки и опрессовки (при изготовлении слоистых изделий).

Заключительной операцией изготовления резиновых изделий является вулканизация. Она может производиться в прессах, в автоклав-прессах, на непрерывных вулканизаторах. Все формовые изделия вулканизируются на этажных прессах с паровым или электрическим подогревом плит. Армированные формовые изделия массой более 1 кг обычно изготавливают на литьевых прессах или в автоклавах. При литье под давлением процесс вулканизации происходит непосредственно в форме. При производстве длинномерных изделий применяется непрерывная вулканизация в различных теплоносителях без давления.

Формовые изделия, к которым относятся резиновые и резино-металлические амортизаторы, диафрагмы для регулирования и дозировки жидкостей и газов, уплотнительные кольца, сальники и манжеты, защитные чехлы, пробки, втулки и др., изготавливают путем прессования и вулканизации в формах. При проектировании форм необходимо учитывать усадку резин, которая составляет до 1,5 %. Для обеспечения полноты заполнения формы при прессовании и резин предусматривается объем заготовки смеси несколько больше объема изделия. Для удаления излишка массы по плоскости разъема формы предусматривается на расстоянии 3 мм от кромки концентрически расположенные по отношению к гнезду формы канавки диаметром сечения 4 мм, которые соединены с наружной частью формы. Заготовки нарезают из предварительно шприцованных полос, трубок, шнуров, обрезиненных тканей и др., которые укладывают в пресс-форму, прессуют при соответствующей температуре и затем вулканизируют.

Литье резиновых изделий под давлением производят на плунжерных литьевых прессах с последующей вулканизацией в прессах или автоклавах, а также на машинах для литья и вулканизации с предварительной шнековой пластикацией. В формах необходимо предусматривать облойные канавки трапециевидного или треугольного сечения и выпоры.

Неформовые изделия (уплотнители стекол, дверей, крышек аппаратов, работающих под давлением и в условиях высоких температур, уплотнительных элементов бытовой техники и др.) производят методом шприцевания на шприц-машинах.

Шприц-машина, подобно экструдеру, имеет шнековый питатель с переменным шагом и обогреваемым материальным цилиндром, полую головку, в которой крепятся профилирующие насадки, загрузочное устройство, электропривод и систему охлаждения шнека.

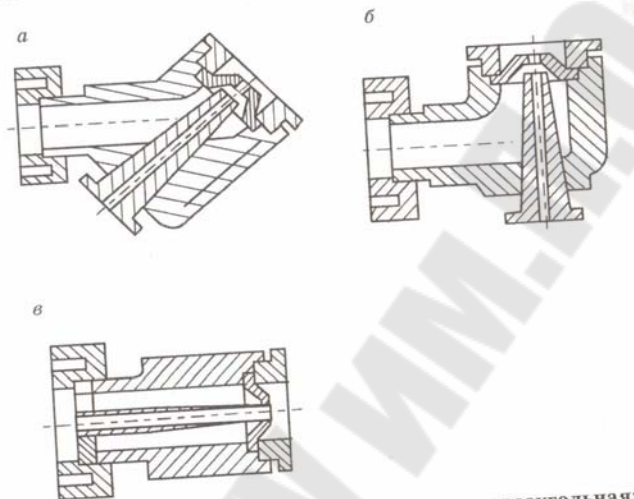


Рис. 7.18. Схемы головок шприц-машин:  
а – косоугольная; б – прямоточная; в – Т-образная

По расположению оси головки по отношению к оси шнека они могут быть прямоточными, косоугольными и Т-образными (рис. 7.18) Прямоточные головки применяют для получения резиновых профилей, некоторые из которых приведены на рис. 7. 19.

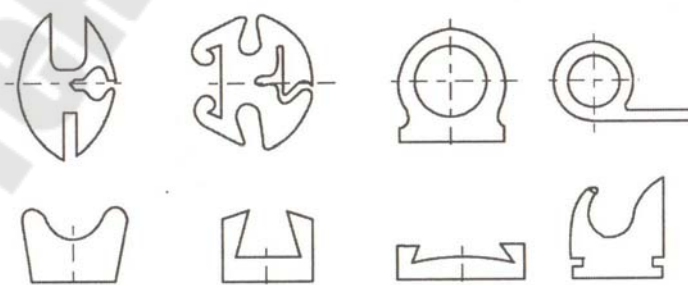


Рис. 7.19. Примеры резиновых профилей

Косоугольные и Т-образные головки используют при облицовке кабелей, лент, рукавов и др. Подаваемые в шприц-машину резиновые смеси предварительно подогревают до 40...50 °С. Шприцуемые профили на выходе из головки опудриваются тальком или покрываются эмульсией, обрезаются по заданной длине и укладываются на лотки. Вулканизация неформовых изделий производится в основном в вулканизационных котлах в течение 25 минут при температуре 150 °С. Применяется также метод непрерывной вулканизации в среде горячего воздуха в вулканизаторах тоннельного типа, а также в средах жидких теплоносителей.

### **Вопросы для самопроверки**

1. В чем состоят особенности структуры полимерных материалов?
2. Нарисуйте термомеханические кривые термопластичных и термореактивных полимеров и охарактеризуйте особенности поведения полимеров в стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем состоянии.
3. Назовите основные компоненты пластмасс и объясните их назначение.
4. В чем различие прямого и литьевого прессования.
5. Перечислите методы изготовления деталей из термопластичных материалов.
6. В чем сущность экструзионного метода получения изделий из пластмасс и виды выпускаемой продукции.
7. Перечислите методы получения изделий из листовых пластмасс.
8. В чем сущность методов контактного формования изделий из композиций холодного отверждения?
9. Перечислите основные компоненты, входящие в состав резин и объясните их назначение.
10. Перечислите основные технологические операции получения изделий из резин.



## Литература

1. Технология конструкционных материалов: учебник/О.С. Комаров, В.Н. Ковалевский, Л.Ф. Керженцева и др.; под общ. Ред. О.С. Комарова.- Минск: Новое знание, 2007. - 567 с.

2. Карпович, О. И. Формообразование изделий из композиционных материалов. Лабораторный практикум : учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-36 01 08 «Конструирование и производство изделий из композиционных материалов» / О. И. Карпович. – Минск : БГТУ, 2014. – 122 с

3. Дальский А.М. Технология конструкционных материалов/А.М. Дальский, Т.М. Барсукова и др. М.: Машиностроение, 2002. 511 с.4.

4. Кенько В.М. Неметаллические материалы и методы их обработки / В.М.Кенько – Мн.: Дизайн ПРО, 1998.-240с.

5. Обработка материалов резанием : учебно-методический О23 комплекс / сост. : Л. М. Акулович [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2011. – 272 с. (режим доступа: <https://studfile.net/preview/5441313/page:5/>).

Степанкин Игорь Николаевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ  
ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

**Пособие**

**по одноименной дисциплине для студентов  
специальности 1-36 07 02 «Производство изделий  
на основе трехмерных технологий»  
дневной формы обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 30.03.21.

Рег. № 38Е.  
<http://www.gstu.by>