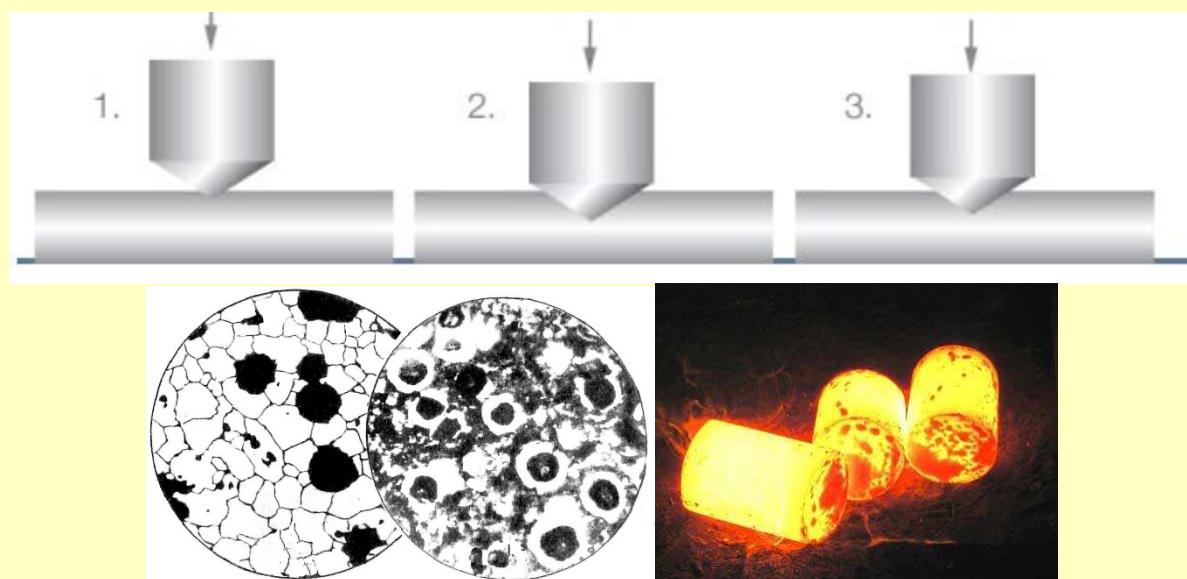


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет  
(СибАДИ)»

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ: ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

## Лабораторный практикум

**Составители: М.С. Корытов, В.В. Акимов,  
И.М. Князев, В.В. Евстифеев, А.Ф. Мишурев**



Омск • 2021

УДК 621.75; 681  
ББК 34.41; 20.4.1  
М34

Согласно 436-ФЗ от 29.12.2010 «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию» данная продукция маркировке не подлежит.

*Рецензент*

канд. техн. наук, доц. В. А. Лисин (СибАДИ);  
канд. техн. наук, доц. М.А. Гольчанский (СибАДИ)

Работа утверждена редакционно-издательским советом СибАДИ в качестве лабораторного практикума.

**М34 Материаловедение: технология конструкционных материалов** [Электронный ресурс] : лабораторный практикум / сост. : М.С. Корытов, В.В. Акимов, И.М. Князев, В.В. Евстифеев, А.Ф. Мишурин. – Электрон. дан. – Омск : СибАДИ, 2021. – URL: [http://bek.sibadi.org/cgi-bin/irbis64r\\_plus/cgiirbis\\_64\\_ft.exe](http://bek.sibadi.org/cgi-bin/irbis64r_plus/cgiirbis_64_ft.exe). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.

Изучены методы замера твердости металлов, области применения макро- и микроструктурного анализа металлов и сплавов, структуры сталей и чугунов и их связь с диаграммой состояния «железо – цементит». Рассмотрены вопросы назначения режимов термической обработки стальных деталей. Приводятся микроструктуры сталей после закалки и отпуска. Рассмотрены вопросы зависимости структур легированных сталей от вида термической обработки и химического состава. Даны структуры цветных сплавов на основе меди, алюминия и магния. Исследованы методы листовой штамповки, объемной штамповки, ручной электродуговой сварки стали, литья.

Имеет интерактивное оглавление в виде закладок.

Предназначен для обучающихся всех форм обучения специальностей 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», 08.05.02 «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей», направлений 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», 44.03.04 «Профессиональное обучение (по отраслям)», 08.03.01 «Строительство».

Подготовлен на кафедре «Автомобили, конструкционные материалы и технологии».

Текстовое (символьное) издание (23,5 МБ)

Системные требования: Intel, 3,4 GHz ; 150 МБ ; Windows XP/Vista/7/10 ; DVD-ROM ; 1 ГБ свободного места на жестком диске; программа для чтения pdf-файлов : Adobe Acrobat Reader

Редактор О.А. Соболева

Техническая подготовка Н.В. Кенжалинова

Издание первое. Дата подписания к использованию 10.02.2021

Издательско-полиграфический комплекс СибАДИ. 644080, г. Омск, пр. Мира, 5  
РИО ИПК СибАДИ. 644080, г. Омск, ул. 2-я Поселковая, 1

## **ВВЕДЕНИЕ**

Дисциплина «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» является базовой при подготовке студентов высших технических учебных заведений. По данной дисциплине известны работы отечественных авторов, которые были учтены при написании данного лабораторного практикума. К ним прежде всего относятся работы В.Б. Арзамасова, Ю.М. Лахтина, Г.П. Фетисова, Ю.П. Солнцева, Г.М. Волкова, П.А. Колесника, С.Н. Колесова, П.С. Красовского, А.М. Дальского, И.А. Арутюнова, Т.М. Барсукова, Л.Н. Бухаркина, В.М. Матюнина, В.А. Веселова, Ю.А. Геллера, А.Г. Рахштада и др.

Целью лабораторного практикума является практическое изучение основных свойств конструкционных материалов, основных технологических процессов в машиностроении.

В данный практикум входит 10 лабораторных работ по разделам курса: «Строение материалов», «Механические свойства материалов», «Сплавы на основе железа», «Термическая обработка и поверхностное упрочнение сплавов», «Легированные стали и сплавы», «Цветные металлы и сплавы», «Основы технологии конструкционных материалов». В описаниях лабораторных работ приводятся краткие теоретические сведения, необходимые студентам для подготовки к самостоятельному выполнению работы, даются методические указания по выполнению работ и составлению письменных отчетов. Самостоятельное выполнение лабораторных работ способствует более полному усвоению теоретического материала, выводит на более высокий уровень инженерно-технического мышления.

### ***Лабораторная работа № 1***

#### **МЕТОДЫ ЗАМЕРА ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И ИХ СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ**

**Цель работы:** ознакомиться с методикой изготовления макро- и микрошлифов для изучения структуры, замера твердости по методам Бринелля, Роквелла и Виккерса. Изучить назначение структурного анализа металлов и сплавов и методику работы с оптическим микроскопом.

#### **Основные свойства металлов**

Все свойства металлов делятся на четыре группы: физические, химические, технологические, механические.

Физические свойства – цвет, плотность, температура плавления, тип кристаллической решетки, полиморфизм, электропроводность, магнитные свойства и т.п.

Химические свойства – окисляемость, растворимость, коррозионная стойкость и т.п.

Технологические свойства – прокаливаемость, жидкотекучесть, усадка, штампуемость, свариваемость, обрабатываемость резанием, шлифуемость и т.п.

Механические свойства – прочность, пластичность, упругость, твердость и т.п.

1. Прочность – свойства металла сопротивляться разрушению и появлению остаточных деформаций под действием внешних сил.

Статическая прочность определяется при постоянных или равномерно возрастающих нагрузках (растяжение, сжатие, изгиб).

Основным видом статических испытаний являются испытания на растяжение. Они проводятся на разрывных машинах с использованием стандартных образцов.

Основной характеристикой статической прочности является предел прочности при растяжении  $\sigma_B$  («сигма временное»).  $\sigma_B$  – условное напряжение, которое равно отношению наибольшей нагрузки, предшествующей разрушению образца, к первоначальной площади его поперечного сечения:

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F}, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}, (\text{МПа}), \left( \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \right)$$

В процессе испытаний образец вытягивается (его длина увеличивается). По изменению размеров образца определяют и характеристики пластичности (относительное удлинение и относительное сужение).

2. Динамическая прочность – определяется при мгновенном действии нагрузки (ударе). Ее характеристикой является значение удара КСИ вязкости  $a_y$ , определяемое при ударном разрушении стандартного образца на маятниковом копре.

Ударная вязкость – отношение работы, затраченной на разрушение образца к площади его поперечного сечения.

$$КСИ, KCV(a_y) = \frac{A_H}{F}, \left( \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2} \right), \frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{см}^2}$$

Усталостная (циклическая) прочность – способность металла сопротивляться действию повторяющихся или знакопеременных (циклических) нагрузок не разрушаясь.

Ориентировочно:  $\sigma_y = (0,4 - 0,5)\sigma_B$ , где  $\sigma_B$  – статический предел текучести.

Усталость металла – это процесс зарождения и развития трещины под действием большого числа повторных знакопеременных нагрузок.

3. Пластичность – свойство металла пластиически деформироваться без разрушения под действием внешних сил. Пластичность – это свойство, обратное упругости.

4. Упругость – свойство металла восстанавливать после снятия нагрузки свою первоначальную форму и размеры.

Относительное удлинение  $\delta$  (дельта) определяется отношением приращения длины стандартного образца после разрыва к его первоначальной длине:

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%$$

Относительное сужение  $\Psi$  («кси») определяется как отношение уменьшения площади поперечного сечения после разрыва стандартного образца к его первоначальной площади:

$$\Psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \cdot 100\%$$

Предел прочности при растяжении, так же как и относительное удлинение, и относительное сужение, являются характеристиками основных стандартов классификации марок стали и чугунов.

5. Твердость – свойство материала не испытывать пластической деформации вследствие местного контактного воздействия (обычно сводящегося к внедрению в материал более твердого, не деформирующегося при испытании тела – индентора).

Твердость наряду с прочностью и пластичностью является одним из основных механических свойств металлов. Измерение твердости – неразрушающий метод контроля, что является его достоинством и определяет широкую область применения. Это основной метод оценки качества при термической обработке изделия.

## Методы измерения твердости металлов и сплавов

### Измерение твердости по методу Бринелля

Этот метод применяют для измерения твердости металлов, твердость по Бринеллю которых меньше 450 НВ [1, 2, 3, 4]. Схема испытания твердости дана на рис. 1.1.

Сущность замера твердости: стальной закаленный шарик 1 диаметром  $D$  под действием нагрузки  $P$  вдавливается в образец 2. После снятия нагрузки  $P$  на образце остается отпечаток диаметром  $d$ , который является мерой твердости. Чем больше диаметр отпечатка, тем твердость материала меньше [1, 2, 3, 4]. Согласно ГОСТ 9012–59 диаметр шарика, нагрузка и выдержка под нагрузкой зависят от сплава и толщины образца.

Число твердости по Бринеллю (НВ) подсчитывается как отношение нагрузки  $P$  к площади сферического отпечатка  $F$ :

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

где  $F$  – площадь поверхности отпечатка,  $\text{мм}^2$ ;  $P$  – нагрузка на шарик, кг.

На практике пользуются заранее составленными таблицами, указывающими число НВ в зависимости от диаметра отпечатка  $d$  при постоянных значениях нагрузки  $P$  и диаметра шарика  $D$ .

Работы Н. А. Минкевича, И. А. Одинга, Н. В. Гевелинга показали, что между пределом прочности  $\sigma_B$  и числом твердости НВ различных материалов существуют следующие зависимости:

сталь с 12–45 НВ

$$\sigma_B = 0,35 \cdot \text{НВ};$$

медь, латунь, бронза отожженная

$$\sigma_B = 0,55 \cdot \text{НВ};$$

медь, латунь, бронза наклепанная

$$\sigma_B = 0,40 \cdot \text{НВ};$$

алюминий и его сплавы с 20–45 НВ –  $\sigma_B = 0,35 \cdot \text{НВ}.$

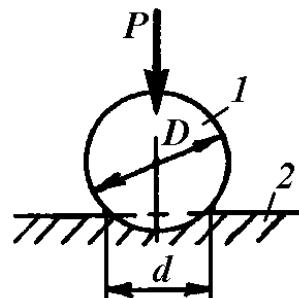


Рис. 1.1. Схема испытания твердости по методу Бринелля: 1 – стальной закаленный шарик; 2 – испытуемый образец

### *Измерение твердости по методу Роквелла*

При испытании на твердость по методу Роквелла в поверхность материала вдавливается алмазный конус с углом при вершине  $120^\circ$  или стальной шарик диаметром 1,588 мм [1, 2, 3, 4]. За условную меру твердости применяется глубина отпечатка. Схема испытания дана на рис. 1.2.

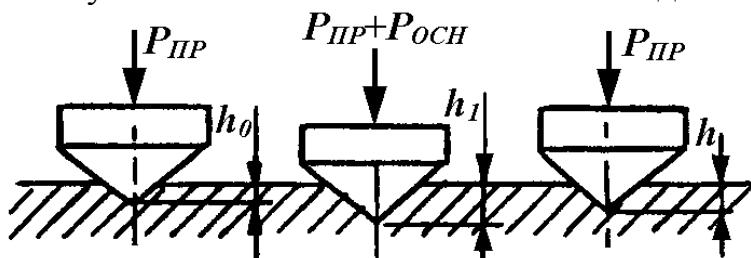


Рис. 1.2. Схема испытаний твердости по Роквеллу:  
 $P_{PP}$  – предварительная нагрузка;  $P_{OCH}$  – основная нагрузка

Вначале прикладывается предварительная нагрузка  $P_{PP}$ , под действием которой индентор (алмаз, шарик) вдавливается на глубину  $h_0$ . Затем прикладывается основная нагрузка  $P_{OCH}$ , под действием которой индентор вдавливается на глубину  $h_1$ . После этого снимают основную нагрузку. Под действием упругой деформации индентор поднимается вверх, но не достигает уровня  $h_0$ . Разность ( $h - h_0$ ) зависит от твердости материала. Чем тверже материал, тем меньше эта разность. Глубина отпечатка измеряется индикатором часового типа с ценой деления 0,002 мм. Число твердости обозначается символом HR. Существуют три способа замера твердости по методу Роквелла:

а) Способ А (HRA 80, HRA 90). Нагрузка вдавливания  $P = P_{PP} + P_{OCH} = 10 + 50 = 60$  кг. В качестве индентора используется алмазный конус. Способом А замеряют твердость твердых сплавов.

б) Способ В (HRB 25, HRB 50). Нагрузка вдавливания  $P = P_{PP} + P_{OCH} = 10 + 90 = 100$  кг. В качестве индентора используется стальной шарик. Способом В замеряют твердость мягких материалов.

в) Способ С (HRC 30, HRC 60). Нагрузка вдавливания  $P = P_{PP} + P_{OCH} = 10 + 140 = 150$  кг. В качестве индентора используется алмазный конус. Способом С замеряют твердость закаленных сталей.

Числа твердости по Роквеллу подсчитываются по формулам:

$$HRA(HRC) = 100 - [(h - h_0)/0,002];$$

$$HRB = 130 - [(h - h_0)/0,002],$$

где 100 и 130 – предельно заданное число делений индикатора часового типа с ценой деления 0,002 мм. Значение твердости по методу Роквелла фиксируется стрелкой индикатора.

### *Испытание твердости по методу Виккерса*

В поверхность материала вдавливается алмазная правильная четырехгранная пирамида с углом при вершине  $\alpha = 136^\circ$ . После снятия нагрузки измеряется диагональ отпечатка  $d$  квадрата [1, 2, 3, 4]. Число твердости по Виккерсу HV подсчитывается как отношение нагрузки  $P$  к площади поверхности пирамидального отпечатка  $M$ :

$$HV = \frac{P}{M} = 1,854 \cdot \frac{P}{d^2}.$$

Нагрузка  $P$  меняется от 1 до 120 кг.

Число твердости по Виккерсу обозначается символом HV с указанием нагрузки  $P$  и времени выдержки под нагрузкой. Размерность твердости не ставится. Продолжительность выдержки индентора под нагрузкой принимают для сталей 10–15 с. Например, 450 HV<sub>10/15</sub> означает, что число твердости по Виккерсу 450 получено при  $P=10$  кг, приложенной к алмазной пирамиде в течение 15 с.

Данным методом замеряют твердость тонких поверхностных слоев.

### **Структурный анализ металлов и сплавов**

#### *Макроструктурный анализ металлов*

Макроанализ – изучение структуры металлов и сплавов при увеличении до 30 раз.

Цели макроанализа:

1. Определить макродефекты (поры, трещины, раковины и т. д.).

Макродефекты недопустимы, так как они ослабляют рабочее сечение дета-

ли и являются концентраторами напряжений при знакопеременных нагрузках. Они должны быть удалены.

2. Определить величину зерна или кристалла в литом металле (рис. 1.3). Кристалл имеет неправильную форму в виде столба и называется еще дендритом (что значит древовидный). Зерно – округленный кристалл. Чем мельче зерно, тем выше вязкость металла и его работоспособность.

3. Определить направление волокон в деформированном металле. Деформированный металл – металл, полученный в результате пластической деформации. При пластической деформации наблюдается смещение слоев металла (зерен) друг относительно друга. При этом согласно законам гидравлики неметаллические включения (оксиды, карбиды, нитриды и т. д.) оттесняются к границам течения слоев металла и располагаются вдоль границ зерен, волокон. Волокно – сильно деформированное зерно. С учетом вышесказанного в опасных сечениях детали волокна должны располагаться параллельно действующим напряжениям (рис. 1.4, а).

4. Изучить излом образца. По характеру излома образца судят о характере разрушения металла. Кристаллический блестящий излом наблюдается при хрупком разрушении стали пониженной вязкости. При вязком разрушении характерен волокнистый (матовый) излом.

Объектом изучения макроструктуры служит макрошлиф, представляющий собой продольное или поперечное сечение детали и подвергнутый следующим операциям: 1) механическая вырезка образца; 2) шлифование образца шлифовальными бумагами различной зернистости или наждачным кругом; 3) травление в 4-процентном растворе  $\text{HNO}_3$  (если материал образца – углеродистая сталь или чугун); 4) промывка спиртом, сушка.

В результате указанных операций в литом металле наблюдаются зерна или кристаллы, а в деформированном – направление волокон (рис. 1.5).

Макроанализ дает грубую оценку качества заготовки, детали. Для более качественной оценки полученной заготовки служит микроструктурный анализ сплавов.

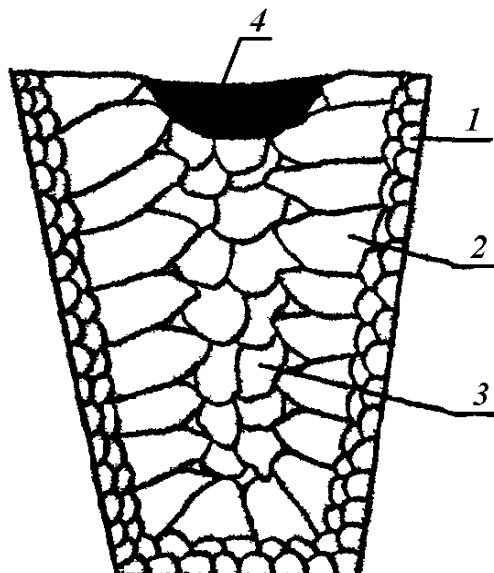


Рис. 1.3. Зерна и кристаллы в литом металле: 1,3 – зерна; 2 – кристаллы; 4 – раковина

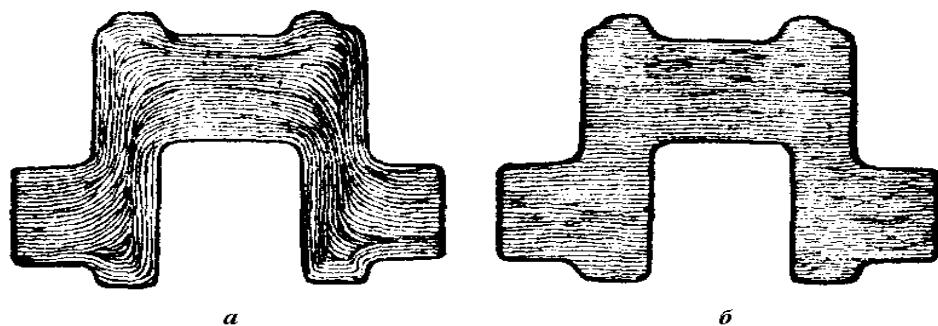


Рис. 1.5. Макроструктуры поковок коленчатого вала: а – правильное расположение волокон; б – неправильное расположение волокон

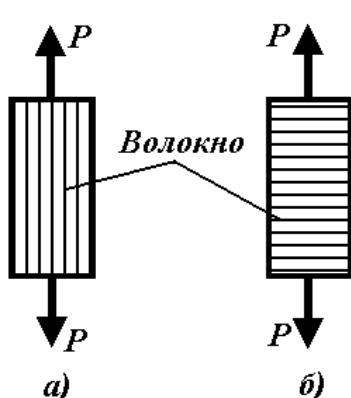


Рис. 1.4. Расположение волокон в деформированном металле ( $P$  – действующая нагрузка в образце):  
а – продольное расположение волокон; б – поперечное расположение волокон

### *Микроструктурный анализ сплавов*

Микроанализ – изучение структуры при увеличении свыше 50 раз. Цели микроанализа:  
а) определить тип структуры; б) определить величину микрозерна; в) определить микродефекты (поры, трещины, раковины и т. д.); г) по микроструктуре в углеродистых сталях определить содержание углерода.

Объектом для изучения микроструктуры служит микрошлиф, представляющий часть детали (заготовки) сечением около  $1 \text{ см}^2$ .

Приготовление микрошлифа происходит в следующей последовательности: а) механическая вырезка; б) шлифование; в) полирование до получения зеркальной поверхности; г) травление в 4-процентном растворе  $\text{HNO}_3$  (если образец из углеродистой стали, чугуна); д) промывка спиртом, сушка.

Цель полирования – получить поверхность с минимальной шероховатостью.

Цель травления – получить шероховатую поверхность из-за различной травимости структурных составляющих.

Структуру изучают на оптическом микроскопе в отраженном свете, так как металлы и сплавы непрозрачные. Схема отражения лучей от травленной поверхности и полученная структура приведены на рис. 1.6.

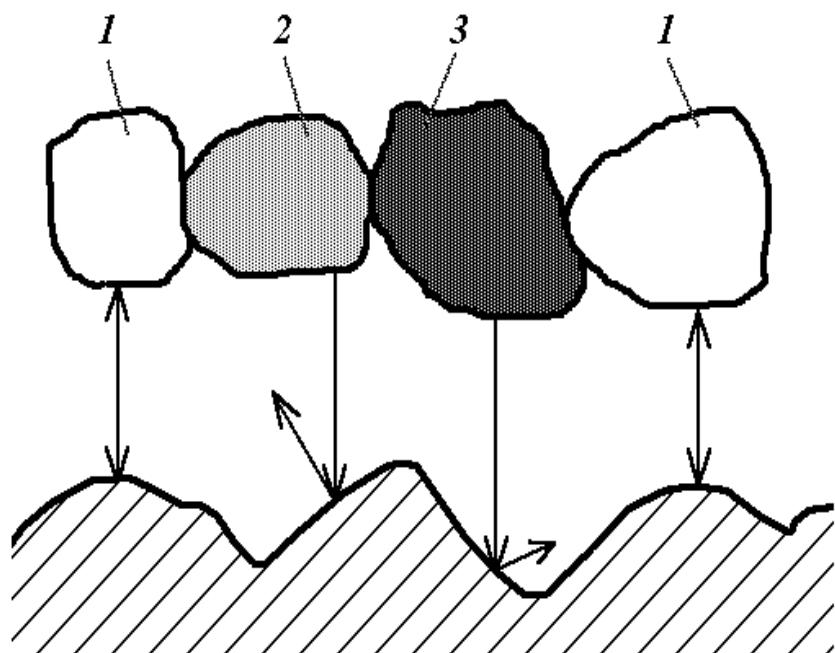


Рис. 1.6. Схема отражения лучей от травленной поверхности и полученная структура: 1 – светлое зерно; 2 – серое зерно; 3 – черное зерно

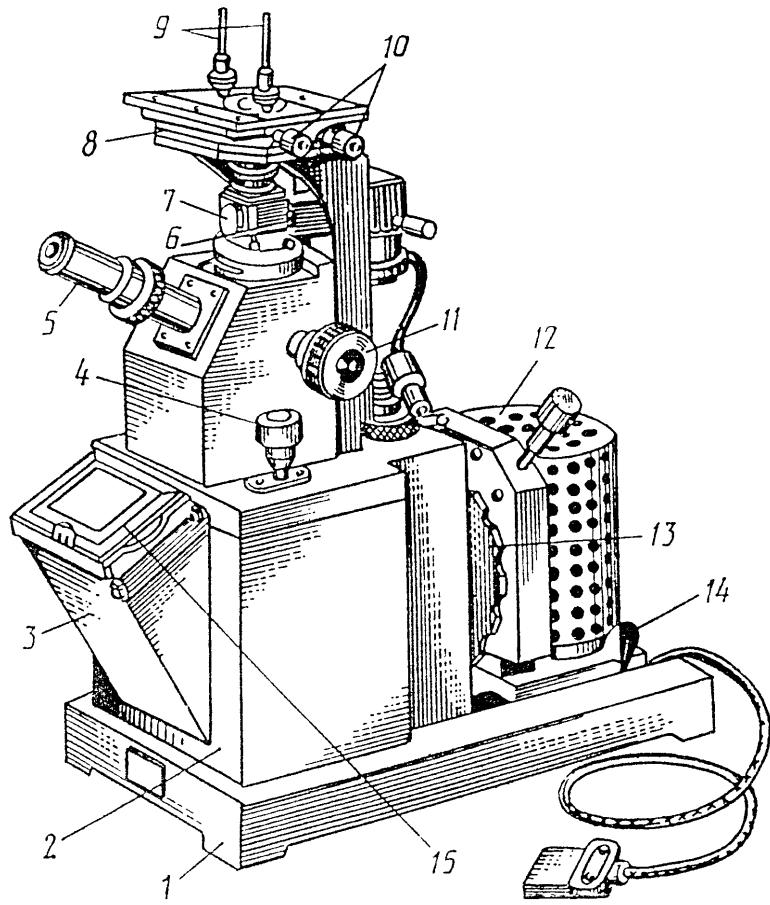


Рис. 1.7. Общий вид микроскопа МИМ-7: 1 – основание; 2 – корпус; 3 – фотокамера; 4 – микрометрический винт; 5 – визуальный тубус с окуляром; 6 – рукоятка иллюминатора; 7 – иллюминатор; 8 – предметный столик; 9 – клеммы; 10 – винты перемещения столика; 11 – макрометрический винт; 12 – осветитель; 13 – рукоятки светофильтров; 14 – стопорное устройство осветителя; 15 – рамка с матовым стеклом

В окуляре микроскопа наблюдаются светлые, серые, черные зерна. Остается только расшифровать, какие это структурные составляющие.

Оптический микроскоп для изучения микроструктуры представлен на рис. 1.7.

Главной частью микроскопа является оптическая система – набор линз, отражательных зеркал, призма, объектив. Микроструктуру можно наблюдать через окуляр 5. Микрошлиф кладется на предметный столик 8, под которым находится объектив. Четкость изображения микроструктуры регулируется винтами 11 и 4. Микроструктуру можно сфотографировать в фотокамере 3.

## **Порядок выполнения работы**

1. По выданным макрошлифам сделать макроанализ: определить макродефекты, тип кристалла (направление волокон). Определить состояние металла (деформированный или литой металл).
2. Под микроскопом рассмотреть микроструктуру выданных микрошлифов, зарисовать, сделать микроанализ.
3. Для сталей 20, 45, 80, У12 замерить твердость по Бринеллю. Построить зависимость твердости по Бринеллю от содержания углерода в стали.
4. Замерить на прессе Роквелла твердость закаленных сталей образцов, выданных преподавателем.

## **Контрольные вопросы**

1. Что такое макро- и микроструктурный анализ металлов?
2. Каково назначение макро- и микроанализа металлов?
3. Как изготовить макрошлиф и микрошлиф?
4. Как величина зерна влияет на вязкость стали?
5. Как должны быть направлены волокна по отношению к направлению действующих напряжений в опасных сечениях детали?
6. Что такое литой и деформированный металл?
7. В чем заключается сущность и назначение методов Бринелля, Роквелла и Виккерса?
8. Какие параметры и показатели выступают в качестве меры твердости при ее определении методами Бринелля, Роквелла и Виккерса?
9. Какими символами обозначается твердость по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу?

## **Лабораторная работа № 2**

# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ «ЖЕЛЕЗО – ЦЕМЕНТИТ». СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ

**Цель работы:** изучить диаграмму состояния Fe–Fe<sub>3</sub>C (железо–цементит) и структуры углеродистых сталей и чугунов.

## **Краткие сведения о диаграмме состояния Fe–Fe<sub>3</sub>C (железо – цементит)**

Диаграмма «железо–цементит» ( $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$ ), рис. 2.1, служит для определения [1, 2, 3, 4]:

- структур сталей в равновесном состоянии в зависимости от содержания углерода и температуры;
  - температуры термической обработки стали;
  - интервала температур для горячей обработки стали давлением;
  - растворимости углерода в аустените и феррите углеродистой стали;
  - концентраций и весового соотношения фаз в сталях и чугунах (при различных температурах).

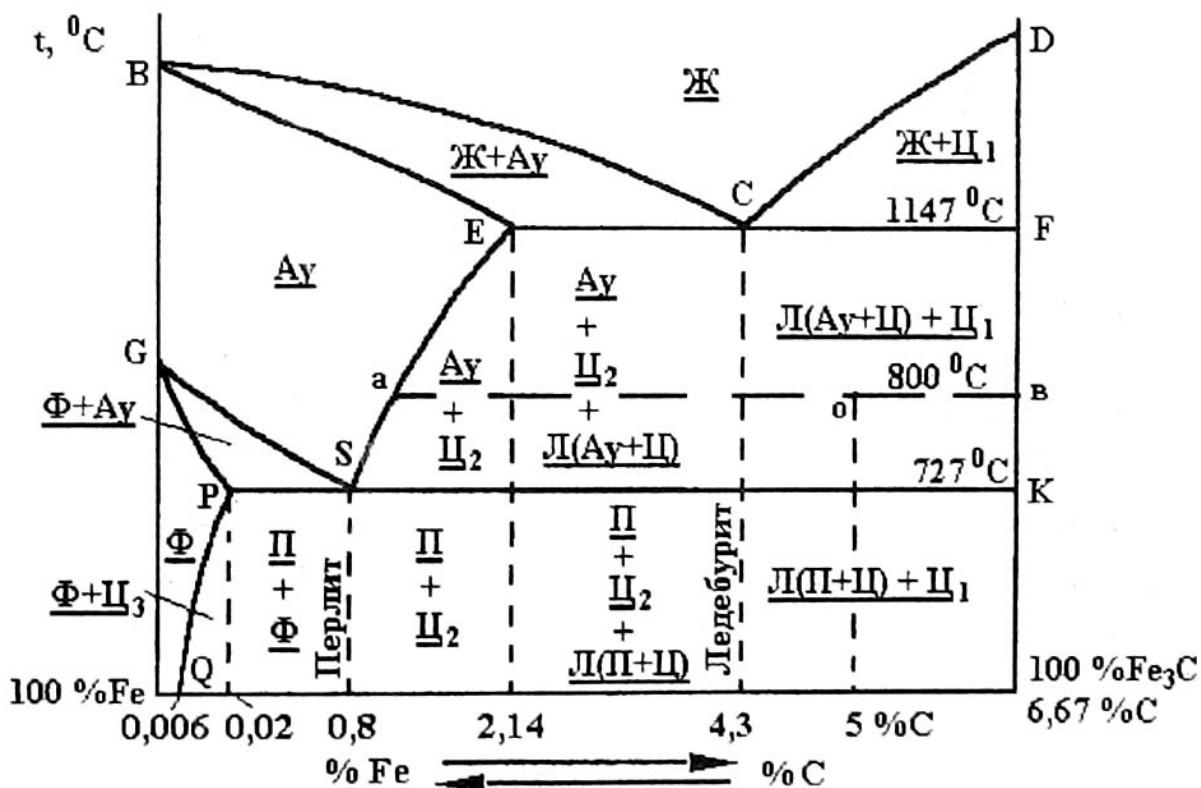


Рис. 2.1. Диаграмма «железо – цементит» (Fe – Fe<sub>3</sub>C)

## *Характеристика структурных составляющих*

*Феррит* – твердый раствор углерода в железе  $Fe_\alpha$ . Твердость феррита НВ 600 (МПа). Растворимость углерода в феррите переменная.

*Аустенит* – твердый раствор углерода в железе  $Fe_\gamma$ . Твердость аустенита НВ 2000 (МПа). Растворимость углерода в аустените переменная.

*Цементит* – химическое соединение железа с углеродом. Твердость цементита НВ 8000–9000 (МПа). Цементит ( $Fe_3C$ ) имеет постоянное количество углерода 6,67% С.

*Перлит* – эвтектоидная механическая смесь феррита и цементита, которая образуется из твердого раствора аустенита. Он содержит постоянное количество углерода (0,8% С) и имеет твердость НВ 2200 (МПа).

*Ледебурит* – эвтектическая механическая смесь аустенита и цементита при температуре выше 727 °С или смесь перлита и цементита при температуре ниже 727 °С. Ледебурит образуется из жидкого раствора, содержащего 4,3% С. Имеет постоянное количество углерода (4,3% С) и твердость по Бринеллю НВ 6000–7000 (МПа).

### *Превращения на линиях диаграммы $Fe-Fe_3C$*

Превращения на линиях диаграммы определяют путем сравнения структур выше и ниже линии, если рассматривают процесс охлаждения. Например, что происходит на линии ВС при охлаждении? Из диаграммы видно, что выше линии ВС структура жидкая, а ниже линии – жидкость и аустенит. Следовательно, жидкость превращается в аустенит.

Рассмотрим превращения на линии PS при охлаждении. Выше линии PS структура  $Au + \Phi$ , ниже линии PS структура  $\Pi + \Phi$ . Сравнивая эти структуры, делаем вывод: на линии PS при охлаждении аустенит превращается в перлит. Аналогичным образом определяются превращения на других линиях диаграммы состояния: на линии CD:  $\overset{\text{Жохл}}{\text{Ж}}$   $\overset{\text{Ц}}{\text{Ц}}_1$ ; на линии BE:  $\overset{\text{Жост}\overline{\text{охл}}}{\text{Ж}}$   $\overset{\text{Au}}{\text{Au}}$ ; на линии ECF:  $\overset{\text{Жост}\overline{\text{охл}}}{\text{Ж}}$   $\overset{\text{Л(Au+Ц)}}{\text{Л}}$ ; на линии PSK:  $\overset{\text{Au}\overline{\text{охл}}}{\text{Au}}$   $\overset{\text{П}}{\text{П}}$ ; на линии SE:  $\overset{\text{Au}\overline{\text{охл}}}{\text{Au}}$   $\overset{\text{Ц}}{\text{Ц}}_2$ ; на линии PG:  $\overset{\text{Au}\overline{\text{охл}}}{\text{Au}}$   $\overset{\text{Ф}}{\text{Ф}}$ ; на линии PQ:  $\overset{\text{Ф}\overline{\text{охл}}}{\text{Ф}}$   $\overset{\text{Ц}}{\text{Ц}}_3$ .

$\overset{\text{Ц}}{\text{Ц}}_1$ ,  $\overset{\text{Ц}}{\text{Ц}}_2$ ,  $\overset{\text{Ц}}{\text{Ц}}_3$  – цементит, который выделяется в различные температурные интервалы.  $\overset{\text{Жост}}{\text{Ж}}$  – остаточная жидкость (жидкий раствор углерода в железе).

### *Структура и фаза*

*Структура* – картина строения металла, наблюдаемая под микроскопом.

Обозначения структур приведены на диаграмме состояния  $Fe - Fe_3C$ . Например, сталь 40 при температуре 600 °С имеет структуры  $\Pi + \Phi$ . Белый чугун, содержащий 4,3% С, при 1000 °С, согласно диаграмме состояния, имеет структуру ледебурит, состоящую из смеси аустенита и цементита.

**Фаза** – однородная часть структуры, имеющая границу раздела, при переходе через которую меняются химический состав и кристаллическая решетка.

Однородными частями структур (фазами) на диаграмме состояния Fe – Fe<sub>3</sub>C являются жидкие и твердые растворы, химические соединения (Fe<sub>3</sub>C). Фазы определяются из структуры. Перлит и ледебурит не могут быть фазами, так как они неоднородны. Примеры приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Структуры и фазы**

Структуры	Фазы
П (Ф + Ц)	Ф, Ц
П + Ц + Л (П + Ц)	Ф, Ц
Л (Ау + Ц)	Ау, Ц
Ау + Ф	Ау, Ф
Ж + Ц <sub>1</sub>	Ж, Ц <sub>1</sub>

*Правило концентраций и отрезков*

Для того, чтобы у сплава заданного состава (например 5,0% С) при заданной температуре (например 800 °С) определить концентрацию фаз и их весовое соотношение, необходимо через точку пересечения состава сплава и температуры (точка *O* на рис. 2.1) провести горизонталь влево и вправо до ближайших линий фаз на диаграмме состояния. Точки пересечения укажут концентрацию фаз, а отрезки будут обратно пропорциональны весу фаз.

В точке *O* структура сплава (5,0% С, t=800 °С) – ледебурит и цементит. Из структуры определяем фазы: аустенит и цементит. Для определения содержания углерода в фазе аустенита данного сплава через точку *O* проведем горизонталь влево до пересечения с линией SE фазы аустенита на диаграмме. Точка пересечения *a* укажет содержание углерода в аустените (0,9% С). Для определения содержания углерода в цементите через точку *O* вправо проводим горизонталь до пересечения с линией цементита (DFK). Точка пересечения *b* укажет концентрацию углерода в цементите (6,67% С).

Для определения весового соотношения фаз необходимо воспроизвести указанные отрезки (рис. 2.2).

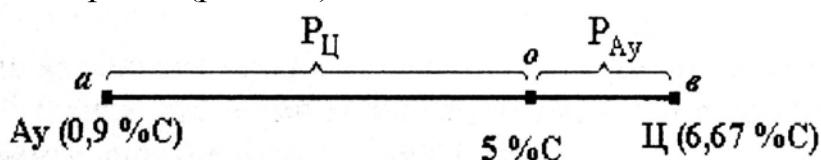


Рис. 2.2. Отрезки для определения весовых долей фаз сплава

Соотношение величин отрезков будет обратно пропорционально соотношению весовых долей фаз. То есть отрезок  $OB$ , прилегающий к фазе цементита, будет пропорционален весу аустенита. Отрезок  $ao$  будет пропорционален весу цементита.

$$\frac{P_{Ay}}{P_C} = \frac{OB}{ao} = \frac{6,67 - 5}{5 - 0,9} = \frac{1,67}{4,1} \approx 0,4$$

Тогда

Таким образом, вес аустенита  $P_{Ay}$  составляет 0,4 от веса цементита  $P_C$ .

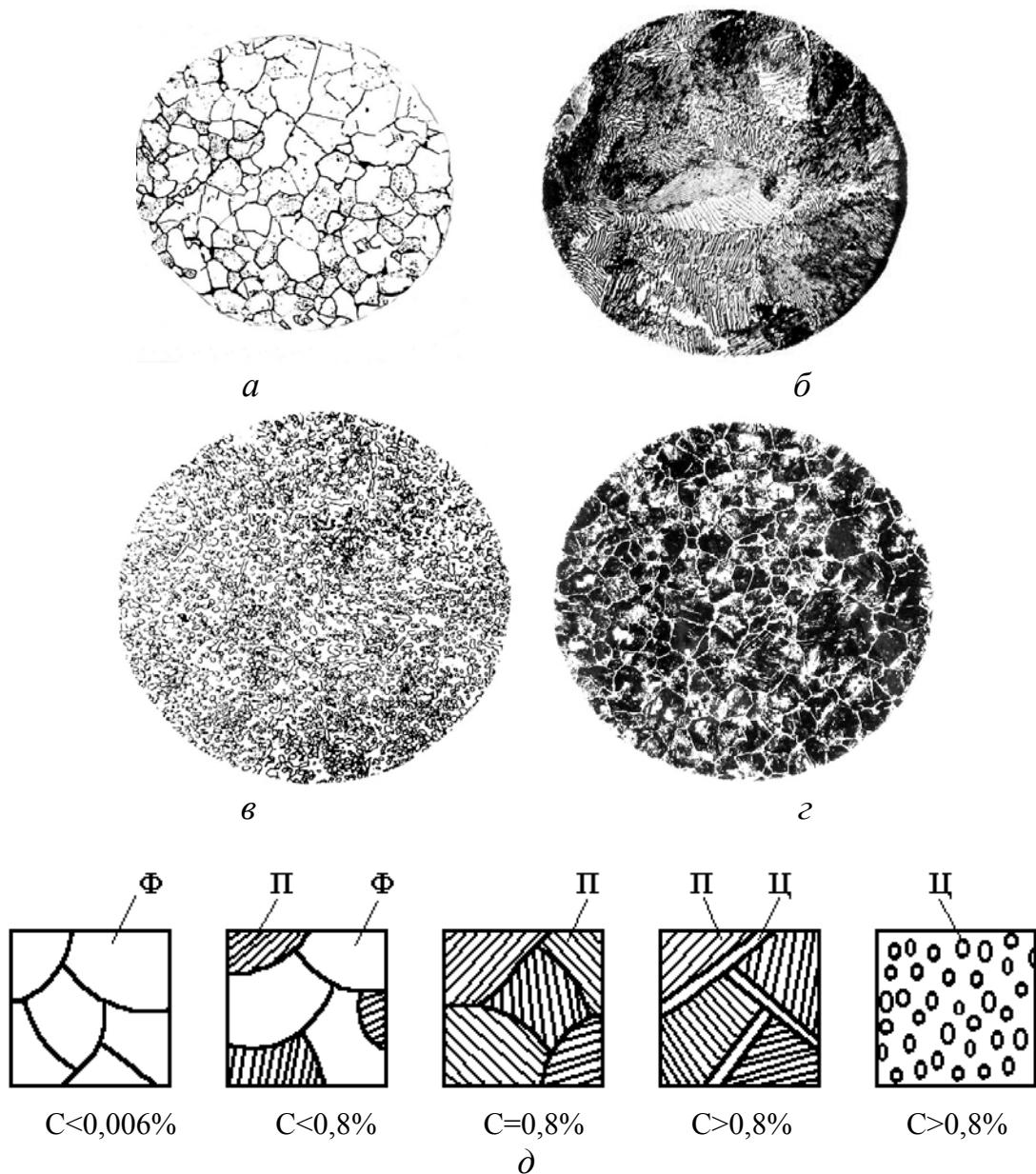


Рис. 2.3. Микроструктуры сталей с различным содержанием углерода: *а* – (феррит) 0,03% С, x100; *б* – (пластинчатый перлит) 0,45% С, x500; *в* – (зернистый перлит) 0,8% С, x500; *г* – (перлит и цементит) 1,2% С, x150; *д* – схемы структур

## **Характеристики сталей**

Сталь – сплав железа с углеродом, содержащий менее 2,14% С. Микроструктуры различных сталей в равновесном состоянии приведены на рис. 2.3.

Имея структуру углеродистой стали, можно определить содержание углерода в ней и марку стали. Содержание углерода в стали определяется по площади перлита (в феррите мало углерода и им можно пренебречь). Так, например, сталь на рис. 2.3, б со структурой феррита и перлита содержит (по площади) 55% П и 45% Ф. Из пропорции

$$100\% \text{ П} - 0,8\% \text{ С}$$

$$55\% \text{ П} - X\% \text{ С}$$

определяем содержание углерода в стали:  $X\% \text{ С} = 0,44$ .

Примерно такое количество углерода содержится в стали 45.

Чем больше углерода в стали (до 0,8% С), тем больше в ней перлита, меньше феррита. Перлит тверже феррита. Поэтому с увеличением углерода в стали растет ее твердость, прочность, но падает пластичность, вязкость.

### *Классификация, маркировка углеродистых сталей*

Сталь обыкновенного качества (группа А): Ст0-Ст6. ГОСТ гарантирует механические свойства. Цифра не свидетельствует о содержании углерода!

Сталь обыкновенного качества (группа Б): БСт0-БСт6. ГОСТ гарантирует химический состав стали.

Сталь обыкновенного качества (группа В): ВСт0-ВСт6. ГОСТ гарантирует механические свойства и химический состав.

Сталь качественная: 08-65. Цифра свидетельствует о содержании углерода в сотых долях процента: 0,08-0,65% С.

Сталь высококачественная (в обозначение вводится буква А): 08А-65А. Эти стали должны содержать малое количество серы (менее 0,025%) и фосфора (менее 0,025%). Сера и фосфор – вредные примеси, понижающие вязкость и прочность стали.

Сталь углеродистая инструментальная: У6-У12, У6А-У12А. Цифры свидетельствуют о содержании углерода в процентах: 0,6-1,2% С.

Сталь автоматная: А20, А40. Предназначена для изготовления деталей в условиях крупносерийного и массового производства (болты, гайки, шпильки и др.) на станках-автоматах. Серы содержится около 0,2%, фосфора около 0,2% .

Сталь углеродистая литейная (в обозначение вводится буква Л); 40Л, 45Л, 50Л.

## Характеристики чугунов

Чугун – сплав железа с углеродом, содержащий более 2,14% С. Микроструктура состоит из металлической основы и графитных включений. Последние имеют низкую прочность и создают нарушения сплошности металла, то есть выступают в роли концентратора напряжений.

В зависимости от формы графита и условий его образования различают чугуны: серый (рис. 2.4, *a*), ковкий (рис. 2.4, *б*), белый (рис. 2.8), высокопрочный с шаровидным графитом (рис. 2.4, *в*).

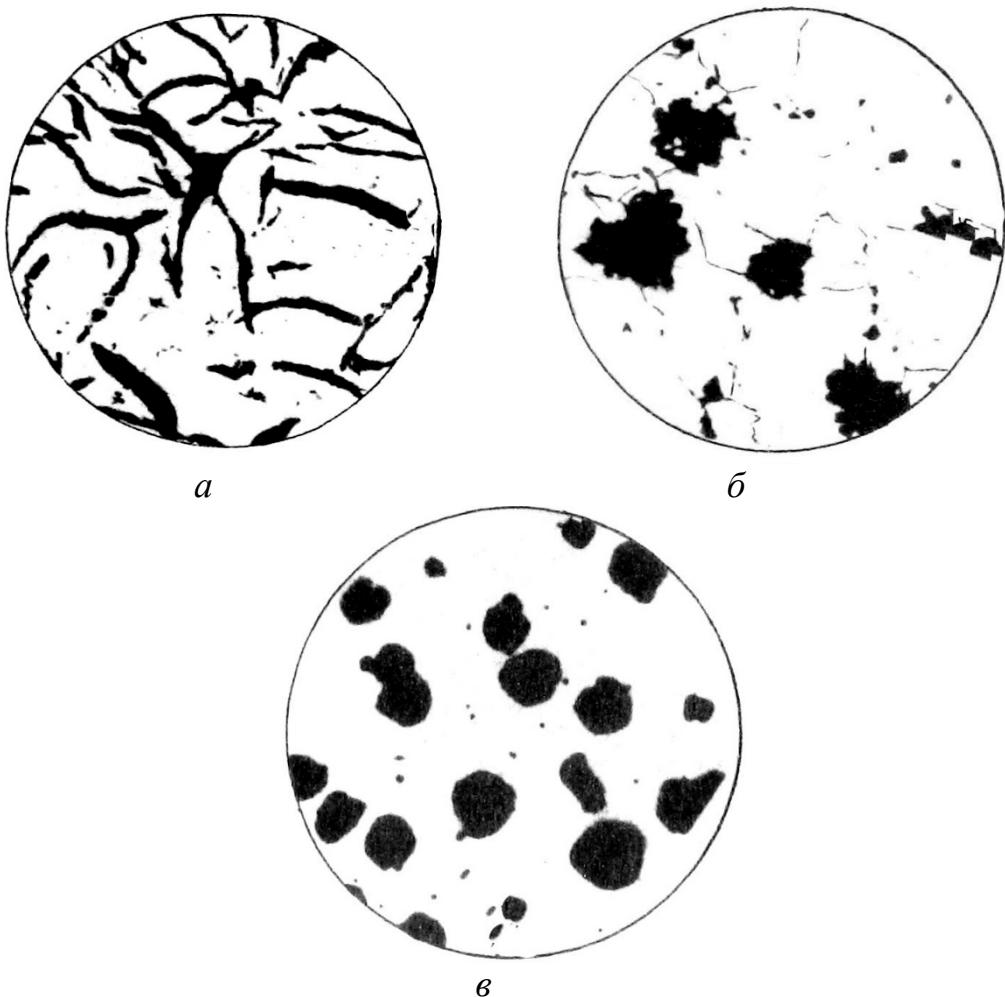


Рис. 2.4. Форма графита в микроструктурах чугунов: *а* – пластинчатая (в сером чугуне); *б* – хлопьевидная (в ковком чугуне); *в* – шаровидная (в высокопрочном чугуне)

## Серые чугуны

Серые чугуны получили свое название из-за серого излома образца, вызванного наличием в сплаве графита. Их получают путем медленного охлаждения расплава ( $V_{\text{охл}} < 10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ). Чем больше углерода и кремния в чугуне, тем большее вероятность выделения из расплава графита. В структуре серых чугунов (чаще всего содержащего от 2,4 до 3,8% углерода)

большая часть или весь углерод находится в виде графита (на микрошлифе, рис. 2.4, *a*, виден в виде пластинок). Чем выше содержание углерода, тем меньше прочность чугуна, но выше жидкотекучесть при литье.

Маркируются серые чугуны: СЧ 15, СЧ 25, СЧ 40, СЧ 45. Цифры показывают предел прочности на растяжении в кгс/мм<sup>2</sup>. Структуры серых чугунов приведены на рис. 2.5.

Металлическая основа серых чугунов имеет структуру: а) феррит; б) феррит и перлит; в) перлит. Неметаллическая часть состоит из графита пластинчатой формы. Из всех видов графита пластинчатая его форма обладает минимальной прочностью при нагружении, что придает серому чугуну низкую прочность на растяжение, пластичность, вязкость. Поэтому из серых чугунов отливаются детали, работающие на статическую нагрузку (крышки, фланцы, корпуса редукторов, тормозные барабаны, гильзы блока цилиндров, корпуса насосов и т. д.).

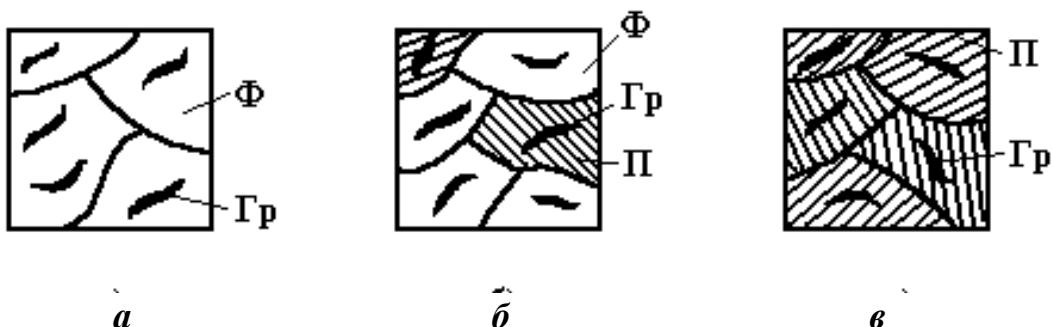


Рис. 2.5. Микроструктуры серых чугунов: *а* – феррит + графит; *б* – феррит + перлит + графит; *в* – перлит + графит

Снижая механические свойства серого чугуна, графит способствует измельчению стружки при обработке резанием и оказывает смазывающее действие, что повышает износостойкость чугуна. В то же время пластинчатый графит обеспечивает малую чувствительность серого чугуна к дефектам поверхности. Поэтому усталостная прочность чугунных деталей соизмерима со стальными.

### Ковкие чугуны

Ковкие чугуны не подвергаются ковке – это литейный материал. Слово «ковкий» подчеркивает повышенную пластичность и прочность ковких чугунов по сравнению с серыми чугунами. Этому способствует хлопьевидная форма графита, которая меньше влияет на механические свойства. Маркируются ковкие чугуны: КЧ 30-6, КЧ 37-12, КЧ 60-3, КЧ 80-1,5. Первая цифра показывает предел прочности материала в кгс/мм<sup>2</sup>, вторая – относительное удлинение в процентах. Структуры ковких чугунов приведены на рис. 2.6.

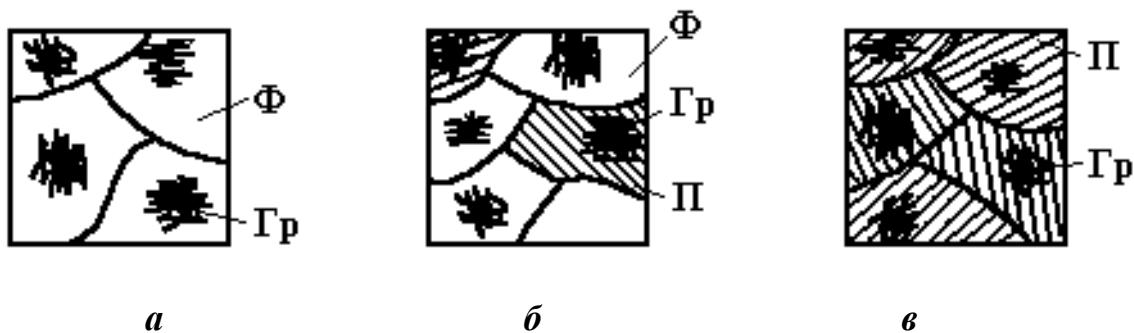


Рис. 2.6. Микроструктуры ковких чугунов: а – феррит + графит; б – феррит + перлит + графит; в – перлит + графит

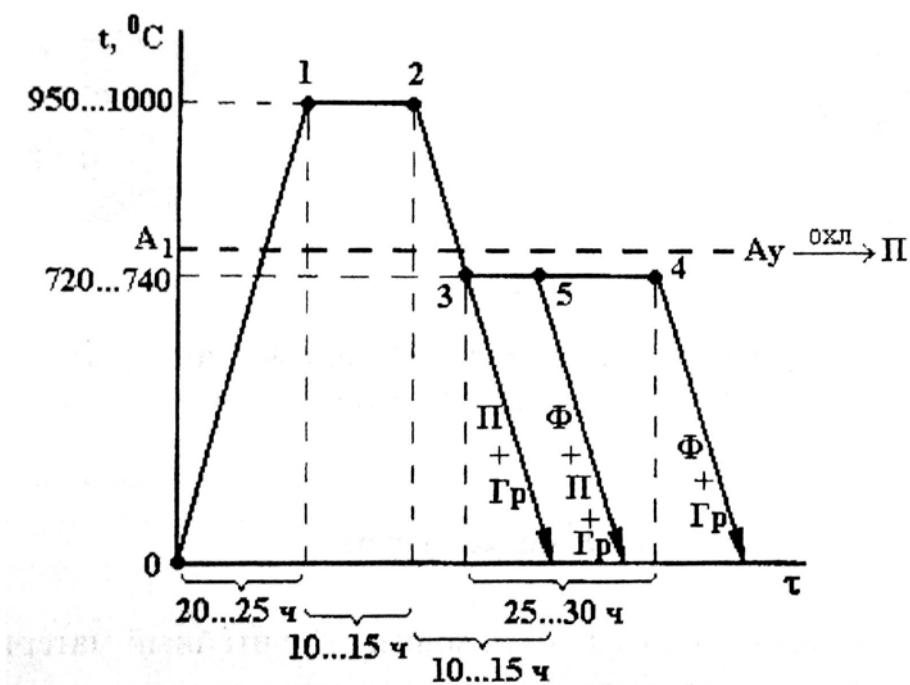


Рис. 2.7. Схема получения ковкого чугуна

Металлическая основа состоит: а) из феррита; б) феррита и перлита; в) перлита. Неметаллическая часть – графит хлопьевидной формы. Изделия из ковкого чугуна получают путем длительного отжига отливок из белого чугуна, содержащего 2,4–2,9% C, 1,0–1,6% Si, 0,2–1,0% Mn, по следующему режиму (рис. 2.7).

В точке 0 структура белого чугуна: перлит + ледебурит + цементит. При нагреве отливки до температуры 950–1000 °С (точка 1) структура белого чугуна уже будет соответствовать согласно диаграмме состояния Fe – Fe<sub>3</sub>C: аустенит + ледебурит + цементит.

Цель длительной выдержки (в течение 10–15 ч) при температуре 950–1000 °С – разложить свободный цементит и цементит ледебурита на железо (аустенит) и углерод в виде графита хлопьевидной формы (первая

стадия графитизации). В точке 2 структура чугуна состоит из аустенита и графита. При охлаждении, переходя критическую температуру  $A_1$ , аустенит превращается в перлит, поэтому в точке 3 структура сплава: перлит + графит. Дальнейшее охлаждение сохранит данную структуру. Если охладить чугун до температуры 720–740 °С (точка 3) и сделать выдержку 25–30 ч при этой температуре, то цементит перлита распадается на железо (феррит) и углерод в форме хлопьевидного графита (вторая стадия графитизации). В точке 4 структура чугуна будет состоять из феррита и графита. Дальнейшее охлаждение отливки сохранит эту структуру. Если выдержку при температуре 720–740 °С сделать менее 25–30 ч, то часть перлита сохранится и в точке 5 отливка будет иметь структуру: перлит + феррит + графит. Дальнейшее охлаждение отливки не изменит структуру.

Хлопьевидная форма графита создает меньшую концентрацию напряжений по сравнению с пластинчатой формой, поэтому пластичность и прочность ковких чугунов выше, чем у серых чугунов. Из ковких чугунов отливают детали, воспринимающие ударные и знакопеременные нагрузки.

### Белые чугуны

В белых чугунах весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита  $Fe_3C$ . Из-за этого цвет излома белый. Структура зависит от содержания углерода (рис. 2.8).

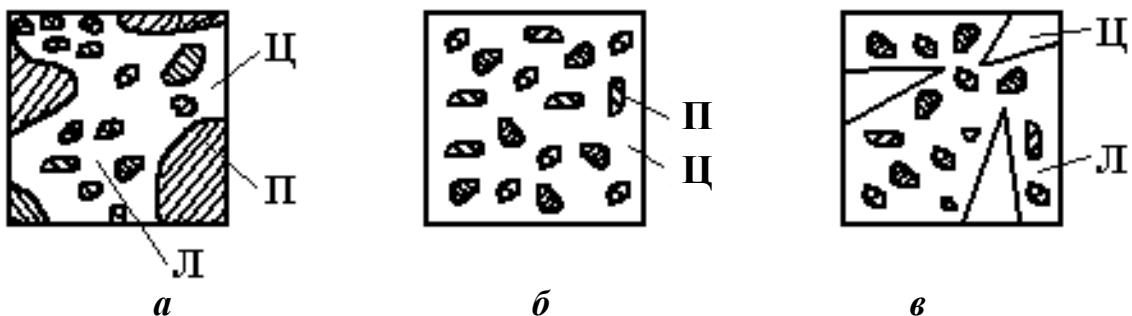


Рис. 2.8. Микроструктуры белых чугунов: *а* – доэвтектического, 3% С; *б* – эвтектического, 4,3% С; *в* – заэвтектического, 5% С, x200

Белые чугуны получают ускоренным охлаждением расплава (со скоростью более 10 °С/мин). Они имеют высокую твердость и в то же время низкую прочность, пластичность, вязкость. Поэтому белые чугуны используются для получения стали (переплав), ковкого чугуна и как износостойкий материал (например, для изготовления крупногабаритных валков листвопрокатных станов).

## Высокопрочные чугуны

Высокопрочными называют чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму. Их получают, добавляя в расплав 0,02–0,08% Mg, а также FeSi (для выделения графита из расплава) с последующим медленным охлаждением. Маркируются высокопрочные чугуны: ВЧ 38, ВЧ 42, ВЧ 50, ВЧ 60, ВЧ 80, ВЧ 120. Цифры показывают предел прочности чугуна на растяжение в кгс/мм<sup>2</sup>. Структуры высокопрочных чугунов приведены на рис. 2.9.

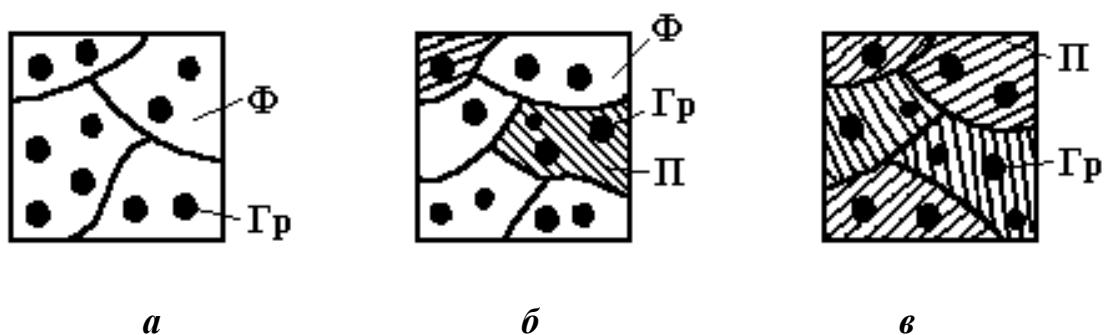


Рис. 2.9. Микроструктуры высокопрочных чугунов: *а* – ферритного; *б* – феррито-перлитного; *в* – перлитного

Из всех форм графита шаровидная форма создает наименьшую концентрацию напряжений. Поэтому отливки из высокопрочных чугунов обладают более высокой прочностью и при этом некоторой пластичностью. Они способны воспринимать небольшие ударные и знакопеременные нагрузки (изготавливают валки прокатных станов, коленчатые валы, поршни и другие детали).

### Порядок выполнения работы

1. Показать на диаграмме Fe – Fe<sub>3</sub>C линии ликвидус, солидус, эвтектического превращения, эвтектоидного превращения.
2. Сформулировать ответы на вопросы, что тверже: цементит или перлит, ледебурит или цементит, феррит или аустенит? Какая кристаллическая решетка у феррита и аустенита?
3. Сформулировать ответы на вопросы: какова структура углеродистых сталей и чугунов: сталь 10 при t=20 °C; сталь У9 при t=20 °C; сталь У8 при t=20 °C; сталь 45 при t=600 °C; сталь У12 при t=730 °C; Сталь У8 при t=800 °C; белый чугун при t=800 °C, содержащий 4,3% С; белый чугун, содержащий 6,0% С при t=900 °C; белый чугун, содержащий 3,5% С при t=60 °C?
4. Какие фазы имеются на диаграмме Fe – Fe<sub>3</sub>C (укажите в табл. 2.2)?

Таблица 2.2

**Фазы в сталях и чугунах**

Структура	Фаза
П (Ф + Ц)	
Л (П + Ц)	
Л + П + Ц	
Л + Ау + Ц	
П + Ф	
П + Ц <sub>2</sub>	

5. Используя правило концентраций и отрезков, определить:
- концентрацию углерода в аустените при  $t=1147$  и  $727$  °C;
  - концентрацию углерода в феррите при  $t=727$  и  $20$  °C;
  - концентрацию углерода в феррите при  $t=400$  °C;
  - весовое соотношение фаз в стали 08 при  $t=20$  °C;
  - весовое соотношение фаз в белом чугуне, содержащем 6,0% С при  $t=20$  °C.
6. Нарисовать микроструктуры стали 60 и стали 10. Какая сталь тверже, прочнее и почему?
7. Ответить письменно на вопросы методических указаний (см. ниже).
8. Защитить выполненную лабораторную работу путем сдачи отчета и устных ответов на контрольные вопросы по указанию преподавателя.

**Вопросы для письменного отчета**

- 1.Что тверже: перлитный ковкий чугун или перлитный высокопрочный чугун?
- 2.При медленном и ускоренном охлаждении жидкого чугуна какой чугун получается?
- 3.Расшифровать марки чугунов: СЧ 25, КЧ 60-3, ВЧ 120.
- 4.Формы графита в чугунах и как они влияют на концентрацию напряжений?
- 5.Можно ли ковать ковкий чугун, почему он так называется?
- 6.Как получить белый, серый, высокопрочный и ковкий чугуны?
- 7.Ковкий перлитный чугун содержит 3% С. Сколько углерода в нем свободного и связанного?

## **Контрольные вопросы и задания**

1. Что такое сталь, что такое чугун?
2. В каких координатах строится диаграмма состояния Fe – Fe<sub>3</sub>C?
3. Какие фазы имеются на диаграмме Fe – Fe<sub>3</sub>C и какая из них самая твердая?
4. Какая структура при комнатной температуре у сталей 10 и У10?
5. Сколько углерода содержат перлит, ледебурит, цементит?
6. Что тверже: сталь 20 или сталь 50, и почему?
7. В каком состоянии находится сплав между линиями ликвидус и солидус?
8. При какой температуре (при охлаждении) аустенит превращается в перлит?
9. Какие фазы имеются в структуре Л + П + Ц?
10. Сталь содержит 30% перлита и 70% феррита. Определить марку стали.
11. Как получить серый, белый, ковкий, высокопрочный чугуны?
12. Почему нельзя ковать ковкий чугун?
13. Можно ли эксплуатировать в двигателях детали из белого чугуна?

### ***Лабораторная работа № 3***

## **ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

**Цель работы:** изучить структуры углеродистых сталей в неравновесном состоянии, влияние закалки и отпуска на структуры и свойства углеродистых сталей; получить практические навыки по проведению термической обработки.

### **Термическая обработка стали**

Технологический процесс термической обработки (TO) – совокупность операций нагрева, выдержки детали, определенное время при заданной температуре и охлаждения с заданной скоростью. Это приводит к изменению механических, физических, химических и других свойств стали. Основными упрочняющими операциями ТО являются *закалка, отпуск и нормализация* [1, 2, 3, 4].

К неупрочняющей операции ТО относится *отжиг*, который заключается в нагреве и медленном (обычно вместе с печью) охлаждении стали. При отжиге твердость и прочность стали, как правило, снижаются.

Цель закалки – предельное повышение твердости стальной детали. Закалке подвергают поршневые пальцы, коленчатые валы двигателей и

механических прессов, распределительные валы, валы редукторов, оси, шестерни, торсионы, пружины, рессоры, режущие и измерительные инструменты и другие детали.

Отпуск проводится для устранения внутренних напряжений в металле, повышения его пластичности и ударной вязкости в определенной (заданной) мере.

### *Превращения, происходящие в стали при охлаждении*

При переохлаждении стали происходит распад аустенита. Из однородного твердого раствора кристаллизуются две отличающиеся по химическому составу фазы: феррит (почти без углерода), цементит (содержащий 6,67% углерода). Ведущими фазами в этом процессе является цементит (для заэвтектоидных сталей) или феррит (для доэвтектоидных сталей), образующиеся обычно на границах зерен аустенита. При росте частиц карбидов лишаются углерода окружающие их области. Зарождаются пластинки феррита. Происходит совместный рост кристалликов феррита и цементита, то есть в основе распада аустенита на перлит, сорбит, троостит лежит диффузионное перераспределение углерода. При небольших степенях переохлаждения аустенит превращается в пластинчатый перлит (рис. 3.1).

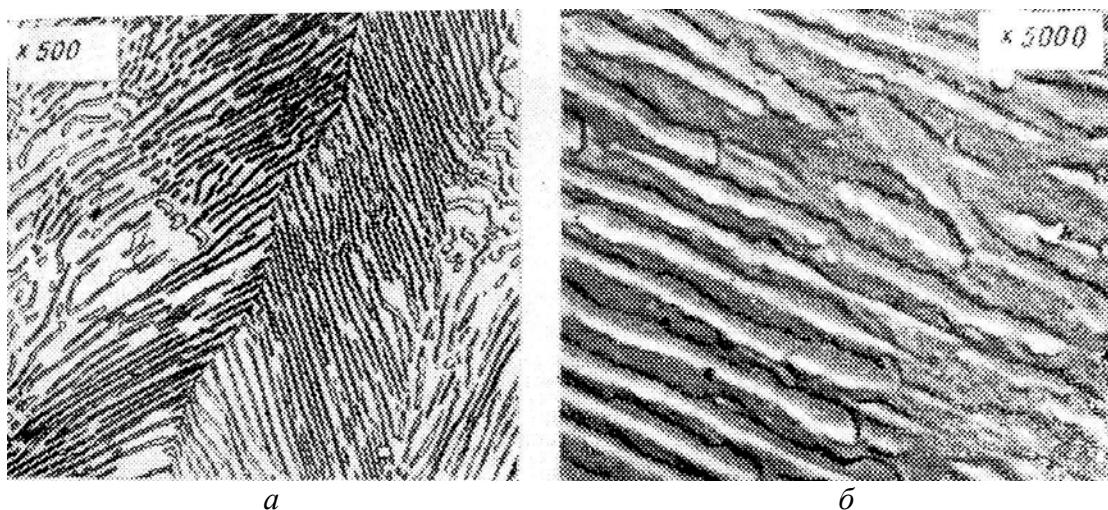


Рис. 3.1. Микроструктура пластинчатого перлита: *a* –  $\times 500$ ; *б* –  $\times 5000$

При утолщении ферритной пластины он оттесняется в аустенит и создаются благоприятные условия для появления новых цементитных пластин. Чем больше переохлаждение, тем тоньше пластинки феррита и цементита. Мелкопластинчатый перлит определяет структуру сорбита (рис. 3.2) и тонкодисперсный перлит – структуру троостита (рис. 3.3).

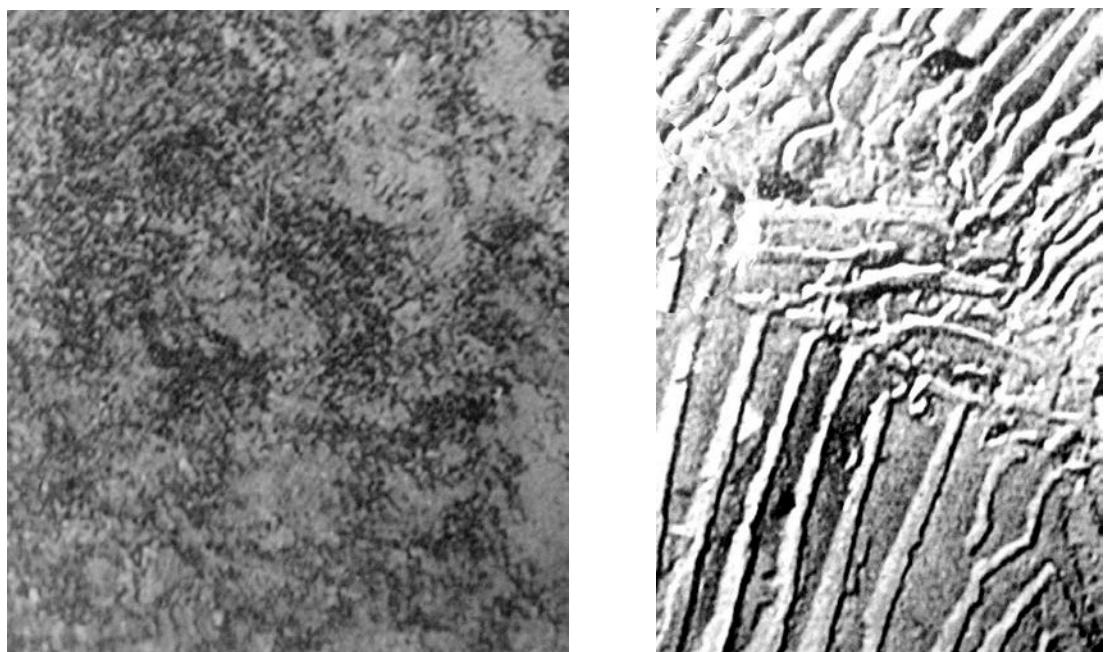


Рис. 3.2. Структура сорбита закалки: *б* –  $\times 39000$

При температурах от  $550^{\circ}\text{C}$  до точки  $M_h$  протекают промежуточные превращения, которые присущи как диффузионному, так и бездиффузионному превращениям. Такие превращения называются бейнитными. Микроструктуры бейнита представлены на рис. 3.4.

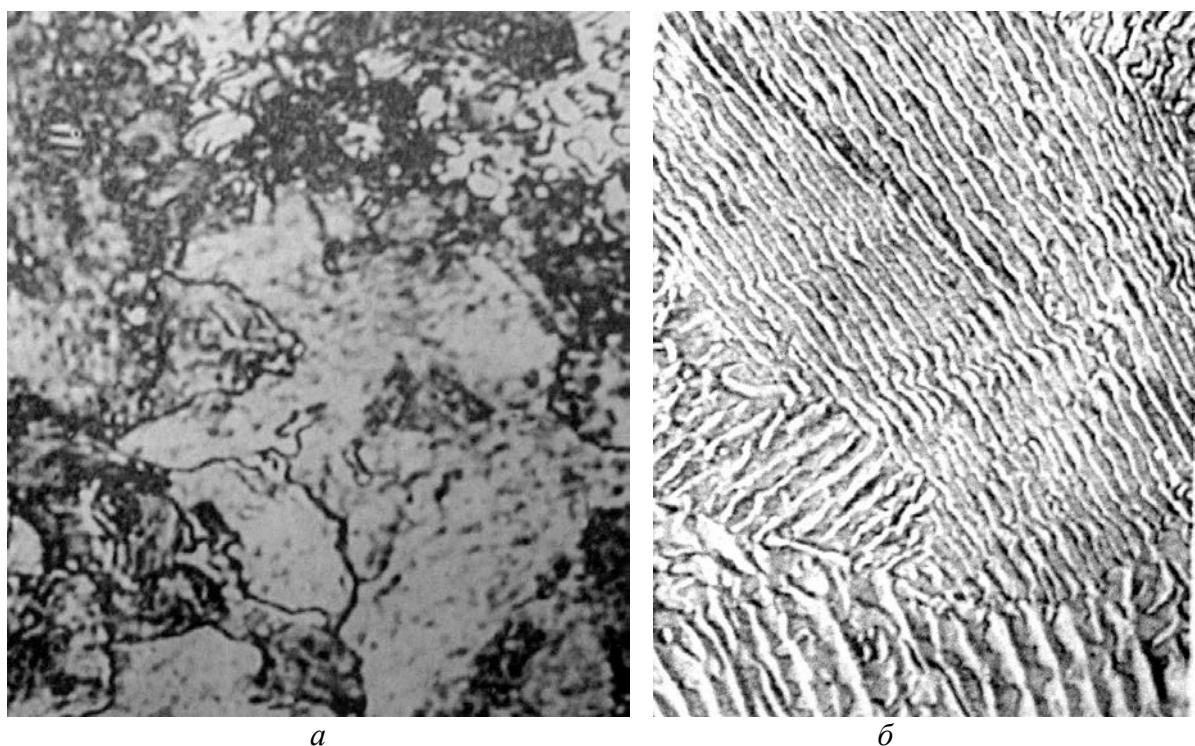


Рис. 3.3. Микроструктура троостита закалки: *б* –  $\times 39000$

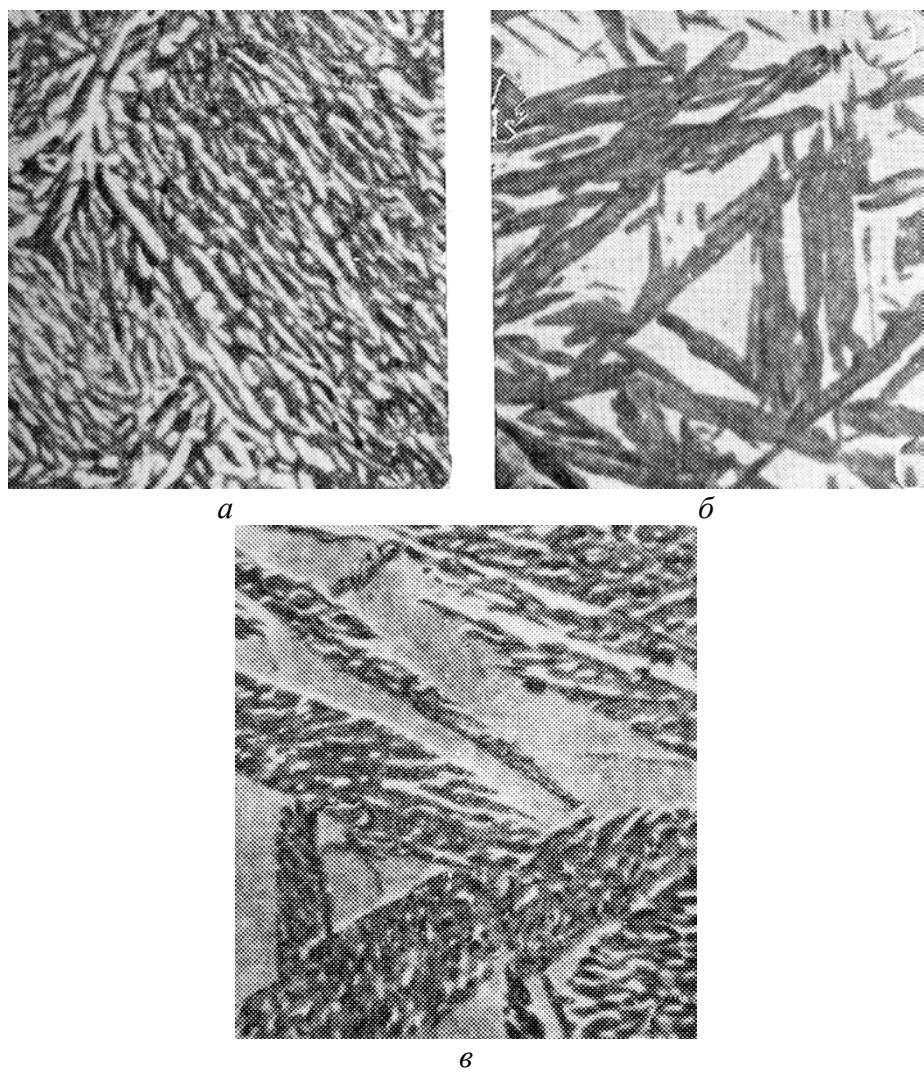


Рис. 3.4. Микроструктура бейнита: *а* – верхний бейнит,  $\times 50000$ ; *б* – нижний бейнит и остаточный аустенит,  $\times 500$ ; *в* – нижний бейнит и остаточный аустенит,  $\times 10000$

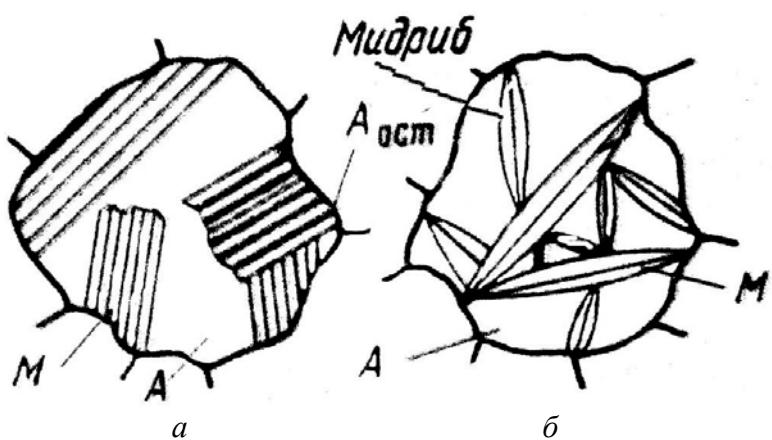


Рис. 3.5. Схема пакетного (*а*) и пластинчатого (*б*) мартенсита: *A* – аустенит; *M* – мартенсит  
(*мидриб* – зона микродвойниковой повышенной травимости)

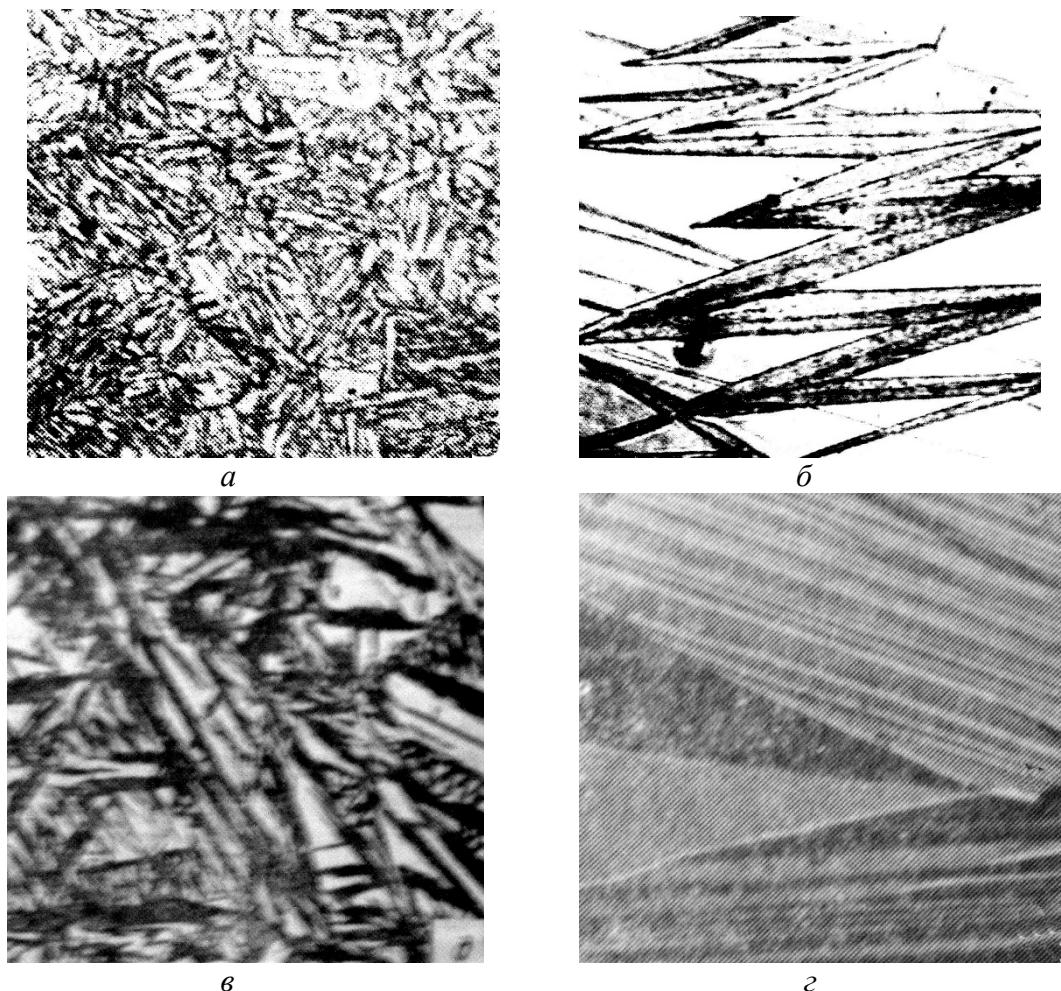


Рис. 3.6. Микроструктура мартенсита: *а* – низкоуглеродистая пакетная, х800; *б* – пластинчатая (фермообразное расположение пластин, х 500); *в* – высокоуглеродистая пластинчатая и остаточный аустенит; *г* – мартенситный рельеф (пакетный)

При очень больших степенях переохлаждения (до температур ниже точки  $M_u$ ) происходит бездиффузионное превращение аустенита в пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в железе  $\text{Fe}_\alpha$  (*мартенсит*). Мартенсит тверже бейнита, имеет низкую пластичность и ударную вязкость.

Структура мартенсита представлена на рис. 3.6. Существует два типа кристаллов: пакетные (реечные, рис. 3.5, *а*), которые имеют форму тонких пластин (0,1–0,2 мкм) и образуются в сталях, содержащих не более 0,5% С (рис. 3.6, *а*, *г*); пластинчатые (двойниковые, рис. 3.5, *б*), которые имеют линзовидную форму и образуются в высокоуглеродистых сталях, содержащих более 0,8% С (рис. 3.6, *б*, *в*).

## Выбор скорости охлаждения детали

Для определения нужной скорости охлаждения детали при закалке необходимо пользоваться диаграммами изотермического превращения аустенита при непрерывном охлаждении (рис. 3.8), начиная от температуры  $A_1$ . Для экспериментального изучения превращения аустенита образцы стали нагревают до температур, при которых аустенит стабилен, а затем охлаждают (переохлаждают) до температур ниже  $A_1$  с различной выдержкой во времени при различных температурах. Происходит распад аустенита, вплоть до полного. Степень распада (рис. 3.7, *a*) фиксируется магнитным, дилатометрическим и другими методами; по кинетическим кривым – «время – температура – степень распада» и строятся диаграммы изотермического превращения аустенита (рис. 3.7, *б*).

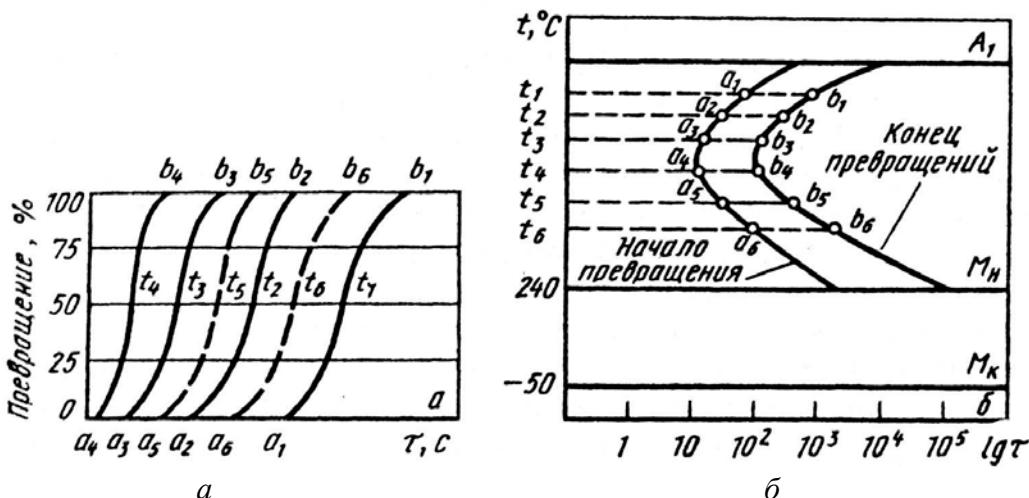


Рис. 3.7. Схема построения диаграммы изотермического превращения переохлажденного аустенита: *а* – кинетические кривые; *б* – диаграмма изотермического превращения аустенита;  $t_1$ – $t_6$  – исследуемые температуры

Кривые  $a1$ – $a6$  и  $b1$ – $b6$  показывают соответственно начало и конец распада аустенита на феррит и цементит. Между этими кривыми в интервалах температур  $A_1$ – $t_1$ ,  $t_1$ – $t_2$ ,  $t_2$ – $t_3$ ,  $t_3$ – $M_h$ , соответственно образуются структуры *перлит*, *сорбит*, *троостит* и *бейнит* (на рис. 3.8 первые три обозначены как *П*, *С*, *T*). Они представляют пластинчатые механические смеси феррита и цементита. Толщина пластин уменьшается от перлита к бейниту. Температуры  $M_h$  и  $M_k$  соответствуют началу и концу распада аустенита и превращения его в *мартенсит*. Кривые охлаждения детали  $V_1$ ,  $V_2$  и  $V_3$  показывают, что после охлаждения «в этих направлениях» образуются структуры: в 1-м – *перлит*; во 2-м – *сорбит*; в 3-м – *троостит*. Кривая охлаждения, которая является касательной к кривой, указывающей на начало превращений, в точке минимальной устойчивости аустенита называется критической скоростью закалки стали  $V_k$ .

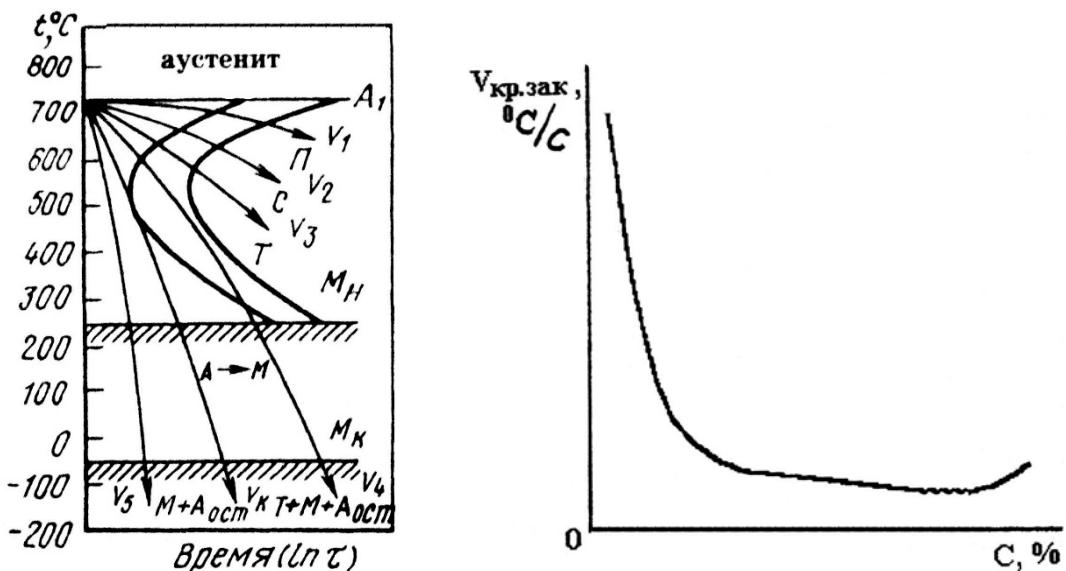


Рис. 3.8. Диаграмма, показывающая влияние скорости охлаждения на температуру распада аустенита и на образование в стали структурных составляющих

Рис. 3.9. Зависимость  $V_k$  от содержания углерода

Можно сказать, что критической скоростью закалки называется та наименьшая скорость охлаждения, при которой в структуре стали получается чистый мартенсит. Так как при закалке максимальную твердость детали получают за счет структуры мартенсита, то условие его образования (условие закалки) будет следующим: скорость охлаждения детали  $V_{\text{охл.дет}}$  должна быть больше или равной критической скорости закалки стали:  $V_{\text{охл.дет}} \geq V_k$  (скорости  $V_4$ ,  $V_5$ ). Критическая скорость закалки стали зависит от содержания углерода (рис. 3.9). Наименьшую  $V_k$  имеют углеродистые стали с содержанием 0,9% С (примерно 150–170 °С/с). С уменьшением содержания углерода критическая скорость закалки увеличивается.

Обращаем внимание и на то, что скорость охлаждения детали зависит от вида охлаждающей среды (табл. 3.1).

Следовательно, чтобы закалить деталь из углеродистой стали, необходимо правильно определить содержание углерода в стали, правильно выбрать температуру закалки, нагреть до нужной температуры электрическую печь, сделать необходимую выдержку, правильно выбрать охлаждающую среду.

*Примечание.* При погружении детали в охлаждающую жидкость вокруг детали образуется паровая пленка из-за того, что температура детали выше температуры кипения охлаждающей среды. Она замедляет скорость охлаждения детали или отдельных ее частей. Условие закалки при этом не выполняется. Для разрушения паровой пленки необходимо обеспечить взаимное перемещение детали и охлаждающей жидкой среды.

## Определение структуры углеродистой стали после закалки

При закалке сталей, содержащих (0,3–0,5%) С с использованием обычных охлаждающих сред (вода, минеральное масло, солевой раствор), образуется мартенситная структура (см. рис. 3.6).

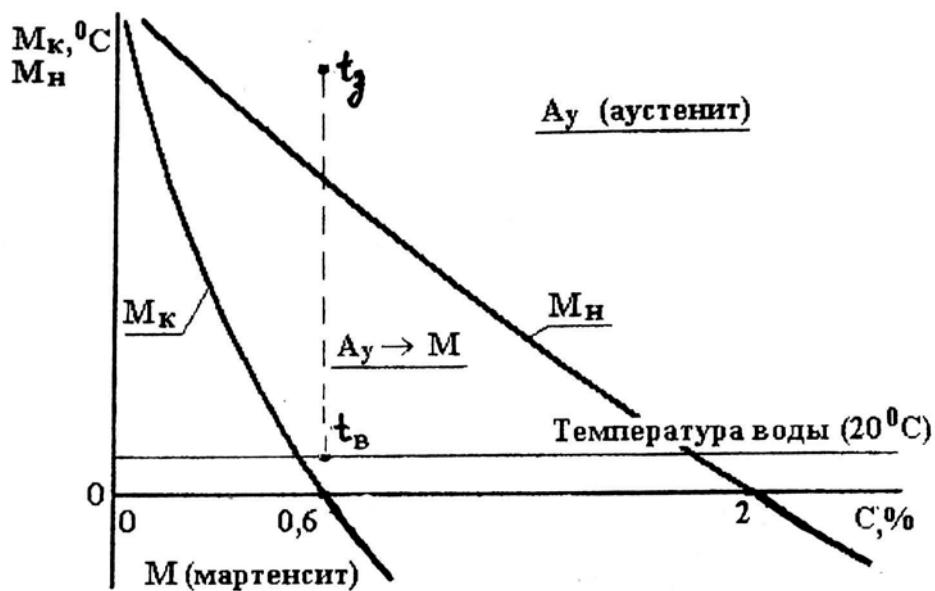


Рис. 3.10. Зависимость температур  $M_h$  и  $M_k$  углеродистых сталей от содержания в них углерода

При содержании углерода в стали (0,6–0,8%), кроме мартенсита после закалки будет присутствовать аустенит остаточный (см. рис. 3.6, в). Это связано с тем, что температура охлаждающей среды находится в интервале температур  $M_h$  –  $M_k$  стали. Так, например, сталь 60 нагревается до температуры закалки  $t_3$ , при которой она имеет структуру аустенита. При охлаждении детали она проходит температуру  $M_h$  и охлаждается до температуры воды  $t_w$  (рис. 3.10). Дальнейшее охлаждение прекращается, поэтому не весь аустенит успевает превратиться в мартенсит. В стали 60 после закалки в воде формируется структура: *martensit + аустенит остаточный*.

Если содержание углерода в стали выше 0,8%, то после закалки структура будет: *martensit + аустенит остаточный + цементит*. Мартенсит образуется из аустенита, так как скорость охлаждения детали выше критической скорости закалки стали. Появление аустенита остаточного связано с тем, что температура охлаждающей среды находится в интервале температур  $M_h$  –  $M_k$  стали. Цементит присутствует из-за его наличия при температуре закалки.

Твердость мартенсита в сталях с содержанием углерода выше 0,6% находится в пределах HRC 58–65.

Скорость охлаждения детали ( $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ )

Таблица 3.1

Охлаждающая среда	Интервал	
	$A_1 - 500$	$M_H - M_K$
Вода техническая, $t=20\ ^{\circ}\text{C}$	600	270
Минеральное масло	150 – 200	30 – 20
Воздух спокойный	30	10
Сплав 75% Sn + 25% Cd	450	50

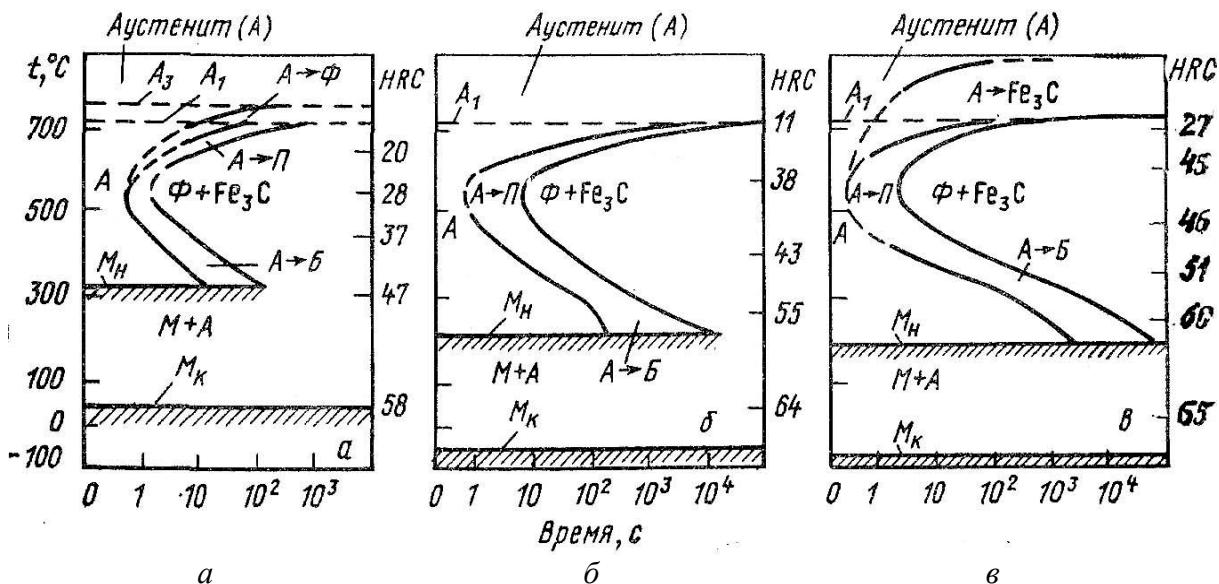


Рис. 3.11. Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита:  
 а – доэвтектоидная сталь (0,45% С); б – эвтектоидная сталь (0,8% С);  
 в – заэвтектоидная сталь (1,2% С)

Изотермическое превращение аустенита в доэвтектоидных и заэвтектоидных сталях отличается от превращения в эвтектоидной стали тем, что в верхнем интервале температур сначала выделяются избыточные фазы – феррит (в доэвтектоидной), рис. 3.11, а, или цементит (в заэвтектоидной), рис. 3.11, в. Начало выделения избыточных фаз показано на диаграммах дополнительными кривыми. Следует отметить также, что увеличение содержания углерода в аустените доэвтектоидной стали повышает его устойчивость, о чем говорит сдвиг вправо кривых изотермической диаграммы (см. рис. 3.11, а).

### Выбор температуры закалки

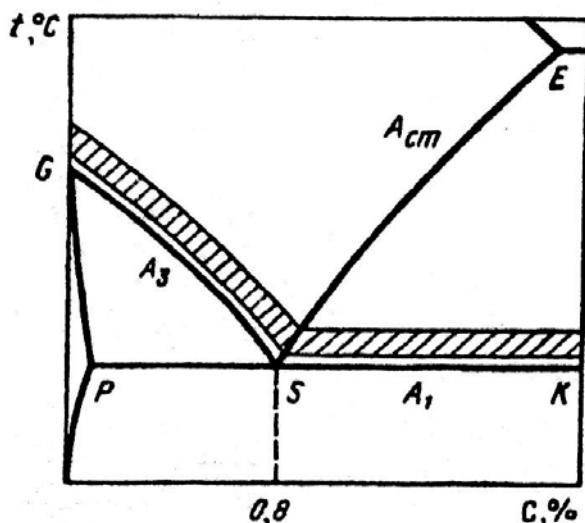


Рис. 3.12. Температуры нагрева углеродистых сталей под закалку: заштрихована область оптимальных температур

На практике температура закалки определяется по диаграмме состояния Fe-Fe<sub>3</sub>C в зависимости от содержания углерода (рис. 3.12). Температура закалки доэвтектоидных сталей ( $C < 0,8\%$ ) —  $t_{зак} = A_3 + (30-50 \text{ }^{\circ}\text{C})$ , а для заэвтектоидной стали ( $C > 0,8\%$ ) —  $t_{зак}=A_1 + (30-50 \text{ }^{\circ}\text{C})$ . Критическая температура  $A_1$  располагается на линии PSK ( $727 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а температура  $A_3$  — на линии GS диаграммы состояния.

### Отпуск углеродистых сталей

Сущность отпуска — нагрев закаленной стали до температуры ниже  $A_1$  ( $727 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), выдержка и охлаждение с любой скоростью. Вид отпуска и его назначение определяются температурой нагрева.

*Низкий отпуск* ( $150-250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) применяется для повышения твердости и износостойкости поверхностного слоя деталей, испытывающих трение в процессе работы (зубья зубчатых колес, кулачки распределительных валов, режущий и измерительный инструмент и т.д.). В процессе нагрева закаленной стали из мартенсита выделяется часть углерода в виде Fe<sub>2</sub>C. Уменьшение количества растворенного углерода снижает тетрагональность мартенсита, внутренние напряжения и твердость. Структура стали после низкого отпуска — мартенсит отпуска (рис. 3.13, а).

*Средний отпуск* ( $300-500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) используется для получения в деталях высокого предела упругости, текучести (пружины, рессоры, мембранны и т.д.). При нем завершается распад мартенсита, из которого выделяется

весь избыточный углерод. Образовавшаяся механическая смесь феррита и цементита имеет зернистое строение (рис. 3.13, *б*) и называется трооститом отпуска. Полностью снимаются внутренние напряжения, вызванные мартенситным превращением.

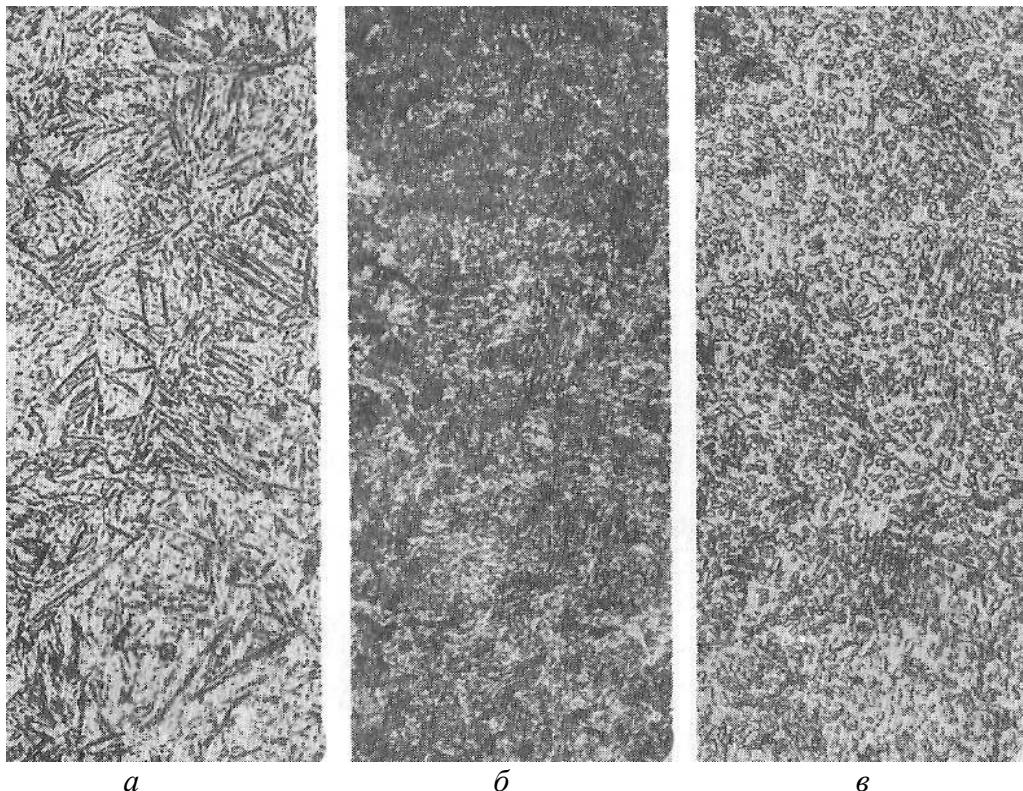


Рис. 3.13. Микроструктуры отпущеной стали (0,6% С), х 500: *а* – мартенсит отпуска; *б* – троостит отпуска; *в* – сорбит отпуска

*Высокий отпуск* (550–680 °С) служит для получения хорошего сочетания прочностных и вязкостных свойств в деталях, работающих на ударные, знакопеременные, вибрационные и циклические нагрузки (валы, зубчатые колеса, шатуны двигателей и т.д.). В указанном интервале температур ферритно-цементитная смесь троостита отпуска коагулирует с образованием более крупной зернистой ферритно-цементитной смеси, называемой сорбитом отпуска (рис. 3.13, *в*). Закалку и высокий отпуск называют улучшением, а стали, подвергаемые улучшению, называются улучшаемыми. Обычно они содержат (0,3–0,5% С) (стали 30, 35, 40, 45, 50).

### Порядок выполнения работы

1. Изучить теорию процессов термического упрочнения с анализом микроструктур.
2. Определить структуру стали (марка выбирается по указанию преподавателя из приложения) после ее непрерывного охлаждения по диа-

грамм распада аустенита. При этом необходимо ответить на вопросы, приведенные в конце приложения.

3. Образцы из различных сталей нагреть в электропечи до соответствующей температуры закалки и охладить каждый в воде, минеральном масле или на воздухе. Замерить твердость образцов после охлаждения и определить структуру. Занести данные в табл. 3.2.

Таблица 3.2

**Свойства сталей до и после закалки**

Марка стали	Предполагаемые структуры после закалки	% C	Исходная равновесная структура	Твердость в состоянии поставки НВ, МПа	Критическая точка под закалку	Структура нагрева под закалку	Температура нагрева под закалку, °C	Температура нагрева печи, °C	Время нагрева и выдержки, мин	Среда охлаждения	Скорость охлаждения детали, °C/с	Твердость после закалки HRC	Структура после закалки
20	Mз												
45	Mз												
У8	Mз												
У8	Tз												
У8	Cз												
У1 2	Mз												

Таблица 3.3

**Твердость и структура стали после отпуска**

Марка стали	% C	Температура отпуска, °C	Время выдержки при отпуске, мин	Твердость стали	Структура стали
У8					
У8					
У8					

4. Закаленные образцы из стали У8 (HRC 60–65) подвергнуть отпуску при температурах 200, 400, 600 °C с охлаждением на воздухе. Замерить твердость образцов после отпуска. Определить структуру. Полученные данные занести в табл. 3.3.

5. Сделать выводы по проделанным экспериментам, построить в масштабе зависимости: а) твердости после закалки от содержания углерода при  $V_{oxl} = \text{const}$ ; б) твердости после закалки от скорости охлаждения детали при  $\% C = \text{const}$ .

## **Контрольные вопросы**

1. В чем состоит цель и сущность закалки?
2. Что такое перлит, сорбит, троостит, бейнит, мартенсит?
3. В чем заключается условие закалки?
4. От чего зависит скорость охлаждения детали и критическая скорость закалки стали?
5. Какова температура закалки стали в зависимости от содержания углерода в стали?
6. В чем заключается причина возникновения паровой пленки вокруг детали при ее погружении в охлаждающую жидкость во время закалки? Как устраниить паровую пленку?
7. Какова структура стали после закалки?
8. В чем заключаются цель и сущность отпуска?
9. Каковы назначение, температура, скорость охлаждения и структура низкого отпуска?
10. Каковы назначение, температура, скорость охлаждения и структура среднего отпуска?
11. Каковы назначение, температура, скорость охлаждения и структура высокого отпуска?

## **Приложение**

Произвести упрочнение детали (по указанию преподавателя):

1. Вал редуктора из стали 50.
2. Пружина из стали 65.
3. Зубья зубчатого колеса из стали 30.
4. Кулачок распределительного вала из стали 45.
5. Рессора из стали 55.
6. Буксируй крюк из стали 40.
7. Сверло из стали У10А.
8. Рабочая часть сверла из стали У12А.
9. Коленчатый вал из стали 35.
10. Мембрана из стали 60.
11. Шарик для пресса бринелля из стали У9А.
12. Шарик шарикоподшипника из стали У11А.
13. Рабочая часть зубила из стали У8А.
14. Шаровая опора из стали 35.
15. Ось из стали 60.
16. Втулка из стали У10А.
17. Втулка из стали У7А.

При решении задач ответить на следующие вопросы:

- а) химический состав стали;
- б) условия работы детали;
- в) способ упрочнения детали;
- г) структура детали перед нагревом;
- д) температура закалки стали;
- е) структура при температуре закалки;
- ж) условия закалки;
- з) структура стали после закалки;
- и) температура отпуска детали;
- к) скорость охлаждения детали при отпуске;
- л) структура стали после отпуска;
- м) ориентировочная твердость стали после отпуска, указать метод замера твердости.

## *Лабораторная работа № 4*

### **ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУР ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

**Цель работы:** изучить классификацию легированных сталей, назначение легирующих элементов, термическую обработку легированных сталей и их структуру.

#### **Предмет и содержание работы**

1. Маркировка легированных сталей.
2. Назначение легирующих элементов в стали.
3. Классификация легированных сталей по назначению, их термическая обработка.
4. Структура легированных сталей после термической обработки.

#### **Маркировка легированных сталей**

Марки легированных сталей обозначаются сочетанием цифр и букв, обозначающих легирующие элементы: Н – никель; Х – хром; К – кобальт; В – вольфрам; Ф – ванадий; Ц – цирконий; М – молибден; Г – марганец; Т – титан; Ю – алюминий; Б – ниобий; Р – бор; П – фосфор; А – азот (если А внутри маркировки стали); А – высококачественная сталь, т. е.  $S < 0,03\%$ ,  $P < 0,03\%$  (если А в конце маркировки стали); Д – медь; С – кремний [1, 2, 3, 4].

Если содержание легирующего элемента превышает 1%, то после соответствующей буквы ставят число, обозначающее среднее содержание легирующего элемента в процентах. Если содержание легирующего эле-

мента в стали около 1%, то после буквы единица не пишется. Первые две цифры в начале маркировки свидетельствуют, что эта сталь конструкционная и содержание углерода в нейдается в сотых долях процента. Например, сталь 16Г2АФД. В ней содержится в среднем: С=0,16%, Mn=2%, N=1%, V=1%, Cu=1%.

В инструментальных сталях первая цифра говорит о содержании углерода в десятых долях процента. Углерод обозначается одной цифрой, а если углерода в стали около 1%, то единица не пишется перед буквенным обозначением стали. Например, стали 9ХС (С=0,9%, Cr=1%, Si=1%) и ХВГНА (С=1%, Cr=1%, W=1%, Mn=1%, Ni=1%, А – высококачественная сталь).

### **Назначение легирующих элементов и их влияние на свойства стали**

Все легирующие элементы, растворяясь в феррите, аустените, цементите, а также образуя химические соединения (карбиды, интерметаллиды), повышают прочность стали, понижая ее пластичность.

Никель повышает одновременно прочность и вязкость стали.

Алюминий, кремний, хром и медь повышают коррозионную стойкость стали.

Алюминий, ванадий, молибден, вольфрам, титан измельчают зерно. Марганец и кремний способствуют получению крупнозернистой структуры в стали.

Молибден и вольфрам устраняют хрупкость стали при отпуске.

Молибден, ванадий, вольфрам, титан повышают жаропрочность стали и ее красностойкость.

Никель, марганец, медь, азот являются аустенизаторами. Карбидообразующие элементы хром, молибден, ванадий, вольфрам и другие являются ферритизаторами.

Все легирующие элементы, за исключением кобальта, кремния и алюминия, увеличивают количество остаточного аустенита при закалке и уменьшают критическую скорость закалки.

### **Классификация сталей**

#### *Классификация по назначению*

- а) конструкционные (15Х, 45ХН, 65С2);
- б) инструментальные (Х, 9ХС, Р6М5);
- в) стали с особыми физическими и химическими свойствами (жаропрочные, нержавеющие, магнитные и др.).

## *Классификация конструкционных сталей*

а) цементируемые ( $C=0,25\%$ ): 10Х, 15ХН, 25ХР. Для обеспечения износостойкости поверхностного слоя осуществляют цементацию с последующей закалкой и низким отпуском. Стали упрочняются: цементация + закалка + низкий отпуск. После упрочнения поверхностный слой имеет структуру:  $M_{отп}$  +цементит + Ay, а сердцевина детали – сорбит или троостит закалки. Первая структура обеспечивает необходимую износостойкость, а вторая – прочность и вязкость при небольших ударных и знакопеременных нагрузках;

б) улучшаемые стали ( $C = 0,3 – 6,5\%$ ): 30ХГСА, 45ХН, 50ХФА. Эти стали применяются в деталях, работающих при больших ударных и знакопеременных нагрузках. Улучшение – это закалка + высокий отпуск. Упрочнение этих сталей – закалка + высокий отпуск. Структура после упрочнения – сорбит отпуска зернистый;

в) рессорно-пружинные стали ( $C = 0,5 – 0,85\%$ ): 50С2 – 85С2, 65Г, 50ХФА, 60С2ХФА. Детали из этих сталей работают на упругие нагрузки и поэтому упрочняются закалкой и средним отпуском. Структура стали после упрочнения – тростит отпуска;

г) строительные стали ( $C<0,2\%$ ): 10ХСНД, 16Г2АФД, 09Г2С. Упрочняются детали из этих сталей нормализацией или закалкой и высоким отпуском.

## *Классификация инструментальных сталей*

а) низколегированные (легирующих элементов менее 5%): Х, ХВГ, 6ХС, 9ХС. Для обеспечения работоспособности инструмента требуется твердость и износостойкость, что достигается закалкой и низким отпуском. Применяются эти стали при низких скоростях резания ( $V_{рез}<25$  м/мин), когда рабочая поверхность инструмента нагревается для температуры ниже 250 °C;

б) быстрорежущие стали. Применяются при средних скоростях резания, когда рабочая поверхность инструмента нагревается до 600 °C. Марки быстрорежущих сталей: Р9, Р18, Р6М5, Р10К5Ф5, Р9М4К8 и др. Р – первая буква английского слова rapid, что значит «быстрый». Цифра после Р обозначает процент вольфрама. Например, сталь Р9М4К9 имеет химический состав по маркировке: 1% C, 9% W, 4% Mo, 8% Co.

В литом состоянии структура быстрорежущей стали Р18 состоит из ледебурита, сорбита закалки и карбидов вольфрама, ванадия, хрома, железа. Карбиды вольфрама и ванадия имеют крупные включения, и их нельзя измельчить термообработкой.

## Структура легированных сталей после термической обработки

В большинстве случаев легированную сталь нельзя металлографически отличить от углеродистой стали (особенно легированную сталь перлитного класса). Она выглядит под микроскопом как углеродистая сталь с таким же содержанием углерода. Легированную сталь можно металлографически отличить от углеродистой в тех случаях, когда она либо содержит много специкарбидов, либо они имеют специфическую форму, либо в структуре стали виден аустенит при комнатной температуре. Рекомендуется изучить описанные ниже стали.

### Конструкционная сталь 30ХГСА

Химический состав: углерод – 0,3%, хром – 1%, марганец – 1%, кремний – 1%, железо – 96,7%. А – высококачественная, то есть содержит пониженное количество серы и фосфора (по 0,025%).

Класс стали в равновесном состоянии доэвтектоидный, а после охлаждения на воздухе – перлитный.

Микрошлиф 1 – после отжига (температура нагрева 880 °C).

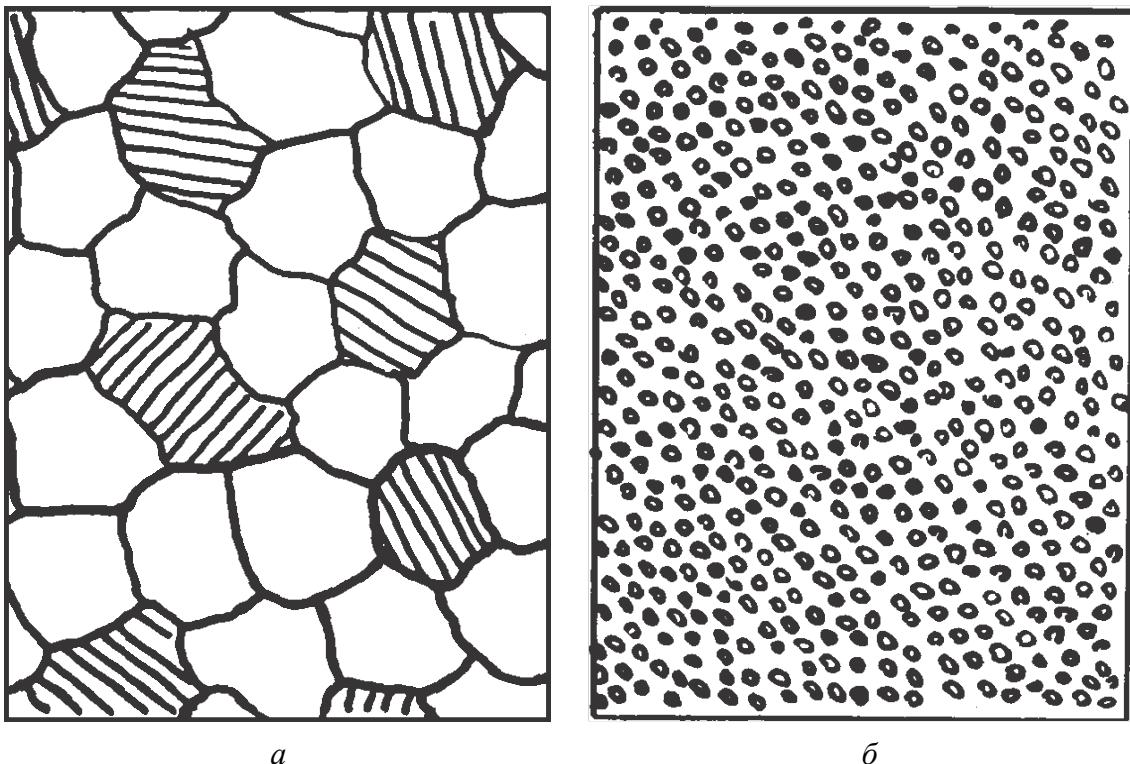


Рис. 4.1. Схемы структур конструкционной стали 30ХГСА: *а* – (после отжига) – феррит (светлые зерна) и перлит (темные зерна), *б* – (после закалки и высокого отпуска) – сорбит отпуска (дисперсные выделения карбидов на светлом фоне феррита)

Структура состоит из феррита и перлита (рис. 4.1, *a*) и при изучении на микроскопе ничем не отличается от структуры углеродистой стали с таким же содержанием углерода. Но различие, однако, есть. Так, легированная сталь имеет твердость НВ 220, а углеродистая – НВ 180. Это различие обусловлено в основном легированностью феррита. Отжиг, обеспечивая стали невысокую твердость, необходим для улучшения обрабатываемости резанием.

Микрошлиф 2 – после термического улучшения (закалка от 880 °С в масле, отпуск при 540 °С). Структура – сорбит отпуска (рис. 4.1, *б*). Характеризуется несколько большей дисперсностью карбидов по сравнению с цементитом углеродистой (нелегированной) стали.

Свойства стали: предел прочности  $\sigma_e=1100\text{ МПа}$  (110 кгс/мм<sup>2</sup>); предел текучести  $\sigma_{0,2}=850$  МПа (85 кгс/мм<sup>2</sup>); ударная вязкость КСВ = 0,5 МДж (5 кгс·м/см<sup>2</sup>). А у нелегированной стали после такой же обработки значения этих характеристик составляют соответственно 600, 400 и 0,5, то есть при одинаковой вязкости легированная сталь значительно прочнее нелегированной. Это объясняется легированностью феррита и большей дисперсностью карбидов. В связи с этим наиболее ответственные детали машин изготавливаются из легированных сталей с обязательным термическим улучшением.

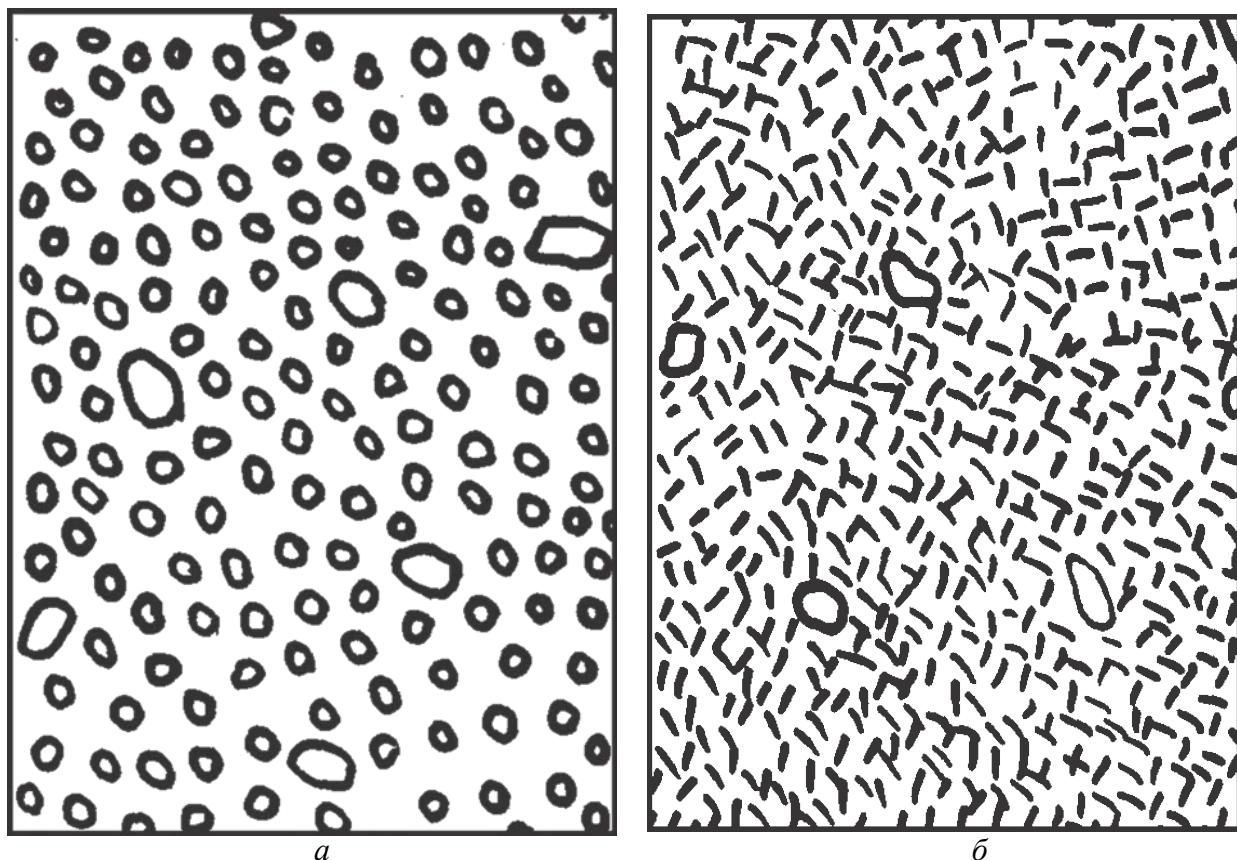


Рис. 4.2. Схемы структур инструментальной стали ХВГ: *а* – после отжига на зернистый перлит (феррит и карбиды округлой формы, более крупные карбиды – вторичные); *б* – после закалки и низкого отпуска – мартенсит отпуска (мелкие игольчатые кристаллы) и карбиды вторичные (округлые включения)

## **Инструментальная сталь ХВГ для режущего и измерительного инструмента**

Химический состав: углерод – 1%, хром – 1%, вольфрам – 1%, марганец – 1%, железо – 96%.

Класс стали в равновесном состоянии заэвтектоидный, а после охлаждения на воздухе – перлитный.

Микрошлиф 3 – после отжига на зернистый перлит (температура нагрева 760 °С). Структура – зернистый перлит (рис. 4.2, а). Состоит из феррита и карбидов округлой формы диаметром 3·10-4 мм. Более крупные выделения карбидов являются вторичными. Такая структура обеспечивает стали твердость НВ 250, что позволяет изготавливать инструмент резанием.

При изучении на микроскопе структура стали не отличается от структуры нелегированной стали с таким же содержанием углерода (У10) после такой же обработки, но последняя имеет твердость НВ 210. Различие твердости сталей обусловлено в основном легированностью феррита и присутствием в структуре специальных карбидов.

Микрошлиф 4 – после закалки от 840 °С в масле и отпуска при 150 °С. Структура – мартенсит отпуска, весьма мелкоигольчатый (рис. 4.2, б). На фоне мартенсита наблюдаются округлые включения карбидов. Такая структура обеспечивает твердость стали HRC 62-65 и лучшую износстойкость инструментам по сравнению со сталью У10. Это объясняется легированностью мартенсита и образованием мельчайших карбидов, которые можно наблюдать при очень больших увеличениях, например на электронном микроскопе. Микроструктуры этих сталей после закалки и низкого отпуска похожи.

## **Быстрорежущая сталь Р6М5**

Химический состав: углерод – 0,85%, вольфрам – 6%, молибден – 5%, хром – 4%, ванадий – 2%, железо – 82,15%. Микрошлиф 5 – после литья.

В структуре присутствует скелетообразная эвтектика (рис. 4.3, а), поэтому по структуре в равновесном состоянии относится к ледебуритному классу. Микрошлиф 6 – после ковки и отжига.

Структура состоит из сорбита закалки и вторичных карбидов (рис. 4.3, б). Твердость стали не должна превышать НВ 255, что необходимо для обеспечения обрабатываемости стали резанием. Кроме того, ковка и отжиг подготавливают внутреннее строение стали к окончательной обработке.

Микрошлиф 7 – после закалка от 1220 °С и трехкратного отпуска при 550 °С. Структура состоит из мартенсита отпуска (весьма мелкоигольчатого), карбидов первичных и вторичных (рис. 4.3, в). Особенностью мар-

тенсита является то, что он высоколегированный. Это достигается высокой температурой нагрева закалки, при которой карбиды растворяются в аустените, повышая его легированность. Однако легированность аустенита приводит к неполному превращению его в мартенсит при закалке. Непосредственно после закалки количество остаточного аустенита составляет 30%.

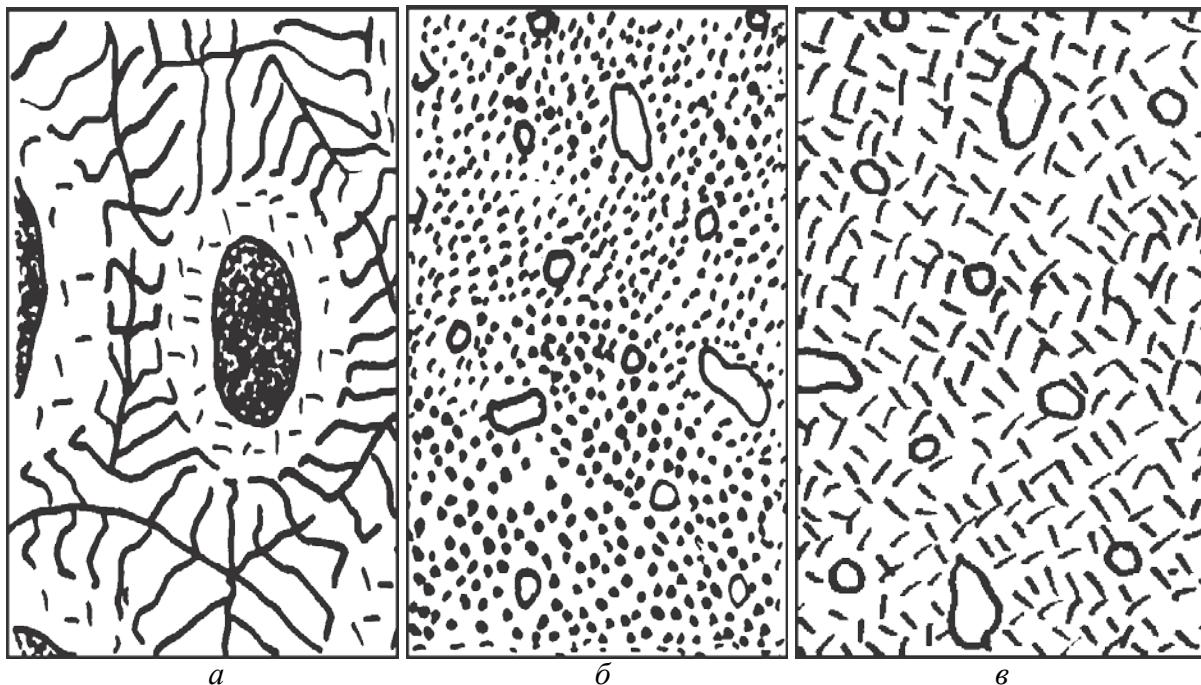


Рис. 4.3. Схема структур быстрорежущей стали Р6М5: *а* – после литья; *б* – после ковки и отжига; *в* – после закалки и трехкратного отпуска

Большое количество остаточного аустенита не позволяет получить нужную твердость. Для превращения его в мартенсит отпуска выполняется трехкратный отпуск при 1550 °С. Твердость стали после такой обработки составляет HRC 63-65. Именно высоколегированный мартенсит обеспечивает стали красностойкость – сохранение твердости не менее HRC 58 после четырехчасового отпуска при температуре 620 °С.

### **Износостойкая сталь 110Г13Л**

Химический состав: углерод – 1,1%, марганец – 13%, железо – 85,9%. Л – литейная сталь.

Класс стали аустенитный.

Микрошлиф 8 – после литья. Структура стали состоит из аустенита и карбидов, выделившихся по границам аустенитных зерен (рис. 4.4, *а*). Особенностью марганцовистого аустенита является способность упрочняться. При воздействии контактных нагрузок поверхность деталей наклепывается, т.е. становится твердой и износостойкой. Кроме того, этот аустенит обеспечивает стали весьма высокую ударную вязкость.

Но выделение карбидов по границам зерен снижает ударную вязкость стали. Микрошлиф 9 – после закалки от 1100 °С в воде.

При высокой температуре нагрева карбиды растворяются в аустениите, а при быстром охлаждении они не успевают выделиться (рис. 4.4, б).

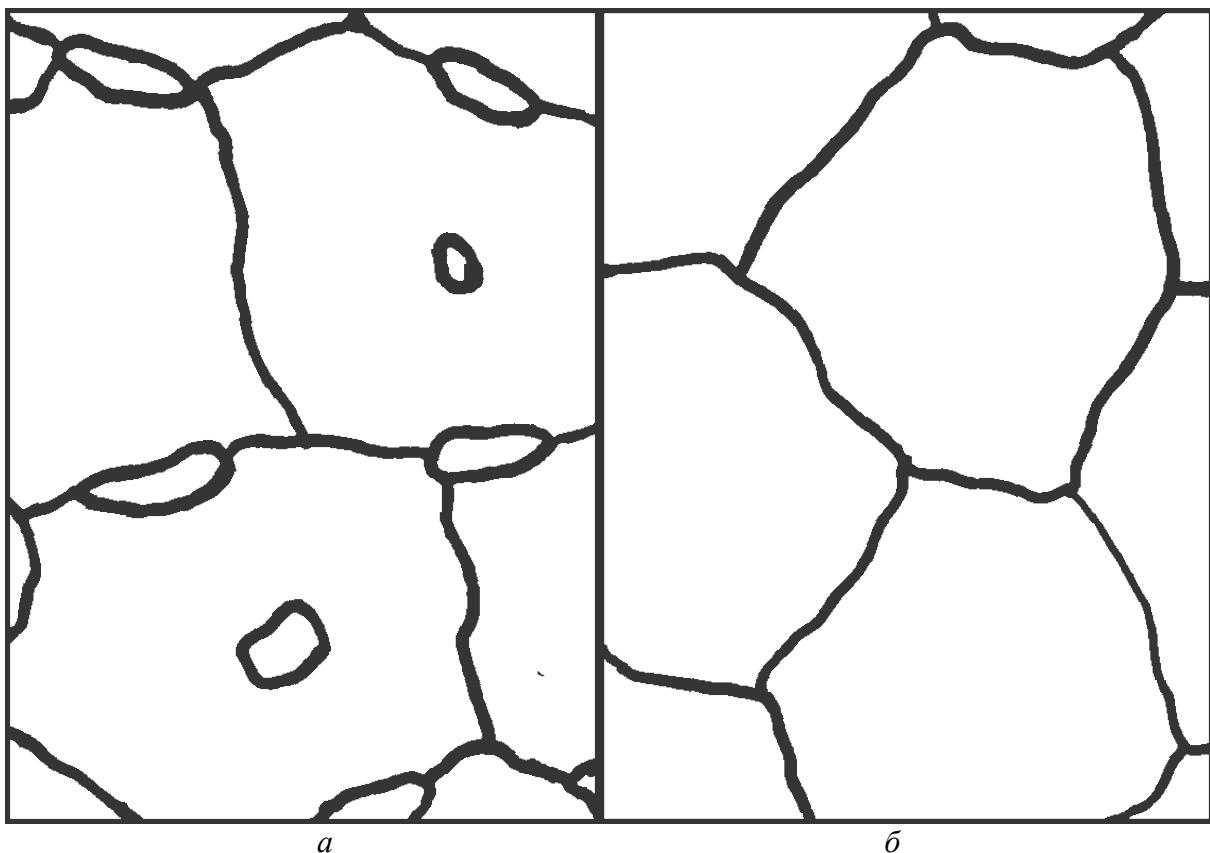


Рис. 4.4. Схемы структур стали 110Г13Л: *а* – после литья – аустенит и карбиды (светлые включения по границам аустенитных зерен); *б* – после закалки – аустенит

Аустенитное состояние обеспечивает стали ударную вязкость  $KCV=3 \text{ МДж}/\text{м}^2$  ( $30 \text{ кгс}\cdot\text{м}/\text{см}^2$ ).

### Порядок выполнения работы

1. Изучить маркировку легированных сталей, назначение легирующих элементов, классификацию легированных сталей, их упрочнение.
2. Зарисовать схемы микроструктур легированных сталей (оборудование: металлографический микроскоп МЕТАМ или МИМ-6).
3. Дать классификацию приведенных сталей по назначению. Указать способ упрочнения, структуру после упрочнения.
4. Указать область применения приведенных сталей.
5. Подвергнуть термической обработке по указанию преподавателя следующие детали машин:

- а) вал редуктора из стали 45ХНМА;
- б) пружину из стали 60С2Н2А;
- в) зубчатое колесо из стали 18Х2НЧМА;
- г) зубчатое колесо из стали 38Х2МЮА;
- д) кулачок распределителя из стали 18ХГТ;
- е) кулачок распределителя из стали 40ХФА;
- ж) рессору из стали 50ХГФА;
- з) буксирный крюк из стали 40ХНА;
- и) сверло из стали ХВСГ;
- к) метчик для нарезания резьбы из стали 9ХС;
- л) измерительную линейку из стали 12ХНЗА;
- м) коленчатый вал, опорами которого являются подшипники скольжения; материал вала – сталь 40ХНМА.

При решении задач ответить на следующие вопросы:

- а) химический состав стали;
- б) классификация стали по назначению;
- в) условия работы детали;
- г) способ упрочнения детали;
- д) структура стали перед нагревом;
- е) температура закалки стали;
- ж) структура при температуре закалки;
- з) условия закалки;
- и) структура стали после закалки;
- к) температура отпуска;
- л) скорость охлаждения при отпуске;
- м) структура стали после отпуска;
- н) ориентировочная твердость после отпуска, указать метод замера твердости.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Перечислить правила маркировки легированных сталей.
2. Сформулировать назначение легирующих элементов.
3. Привести классификацию легированных сталей по назначению.
4. Привести классификацию конструкционных сталей.
5. Привести классификацию инструментальных сталей.
6. Каковы область применения, упрочнение и структура цементируемых сталей?
7. Каковы область применения, упрочнение и структура улучшаемых сталей?
8. Каковы область применения, упрочнение и структура рессорно-пружинных сталей?

9. Каковы область применения, упрочнение и структура инструментальных сталей?

10. Назовите структуры стали 30ХГСА после отжига, закалки и высокого отпуска.

11. Назовите структуры стали ХВГ после отжига, закалки и низкого отпуска.

12. Назовите структуры стали Р6М5 после литья, ковки и отжига; закалки и трехкратного отпуска.

## *Лабораторная работа № 5*

### **ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ**

**Цель работы:** изучить микроструктуры применяемых медных, алюминиевых и магниевых сплавов. Зарисовать и обозначить составляющие изучаемых микроструктур. Установить связь между структурами сплавов и диаграммами состояния.

#### **Предмет и содержание работы**

Цветные металлы и сплавы используются в различных областях народного хозяйства. Алюминиевые и магниевые сплавы широко применяются в аэрокосмической промышленности; медь служит основой изделий электротехнической промышленности; латуни, бронзы используются для изготовления разнообразных изделий [1, 2, 3, 4].

#### **Медные сплавы**

К медным сплавам промышленного применения относятся латуни и бронзы.

**Латуни.** Латунями называются сплавы меди с цинком. Они подразделяются на двойные (простые) и специальные (сложные). Двойные латуни представляют собой двухкомпонентные сплавы меди с цинком. В специальные латуни для придания им определенных свойств помимо цинка вводят кремний, свинец, марганец, алюминий, олово, никель.

О фазовом составе двойных латуней можно судить по диаграмме состояния «меди – цинк» (рис. 5.1).

Практическое применение имеют латуни с содержанием цинка до 44%. Двойные латуни могут быть однофазными (при содержании цинка менее 39%) и двухфазными (при содержании цинка более 39%).

Однофазные латуни имеют структуру  $\alpha$ -твердого раствора и называются  $\alpha$ -латуниями. В данном случае  $\alpha$ -фаза является твердым раствором замещения цинка в меди с кубической гранецентрированной решеткой.

$\alpha$ -латуны обладают высокой пластичностью в холодном состоянии и поэтому используются для изготовления тонких листов и проволоки.

Двухфазные латуны состоят из  $\alpha$ - и  $\beta$ -твердых растворов и называются  $\alpha + \beta$  - латунями.  $\beta$ -фаза является твердым раствором на базе электронного соединения CuZn с объемно-центрированной кубической решеткой. В интервале температур 0 – 458 °С  $\beta$ -фаза представляет собой упорядоченный твердый раствор (обозначается на диаграмме  $\beta'$ ). Присутствие  $\beta'$ -фазы затрудняет пластическую деформацию, но облегчает обработку резанием.

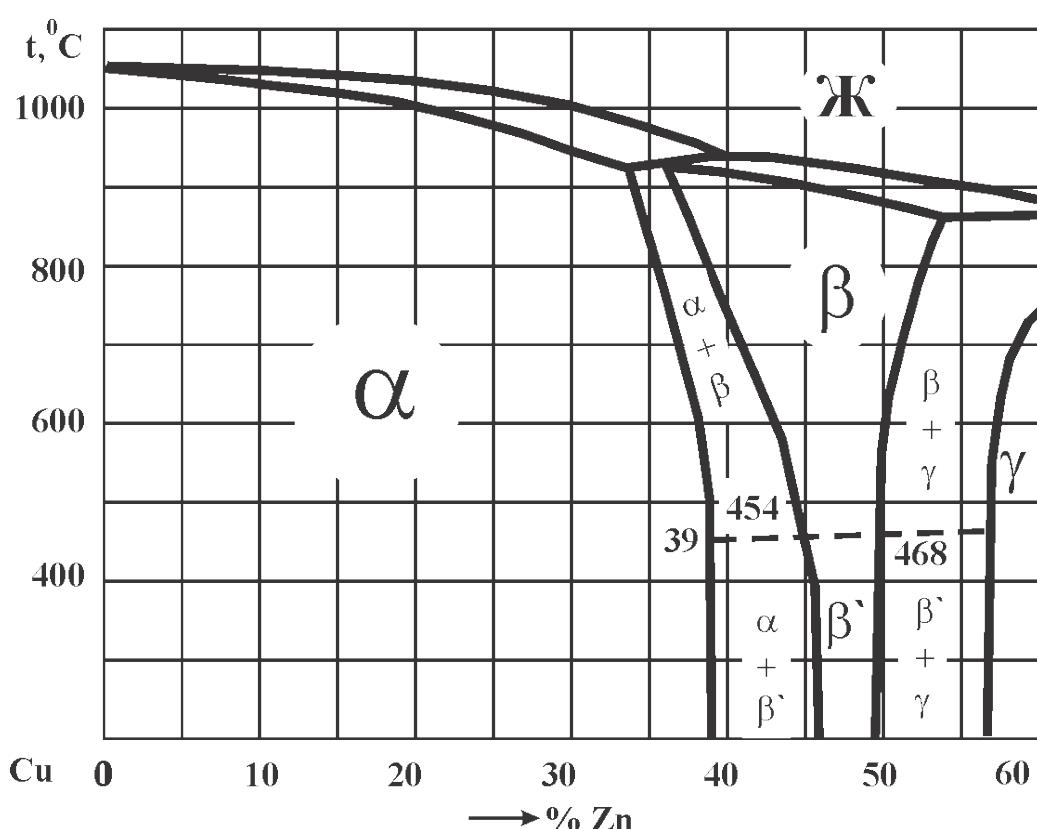


Рис. 5.1. Диаграмма состояния медь – цинк (фрагмент)

При температуре выше 468 °С атомы в  $\beta$ -фазе располагаются статически, и она становится пластичной. Таким образом, деформация  $\alpha + \beta$  - латуней должна производиться в интервале температур 500–700 °С.

Литейные свойства латуней характеризуются малой склонностью к ликвации, хорошей жидкотекучестью, склонностью к образованию усадочной раковины. Таким образом, однофазные  $\alpha$ -латуны обладают хорошей пластичностью ( $\delta = 40\%$ ) и относительно невысокой прочностью  $\sigma_e$  до 294 МПа. Поэтому  $\alpha$ -латуны Л63, Л68, Л70 используются в виде тонких листов, лент и других полуфабрикатов, из которых штампуются различные детали. Латуни с более высоким содержанием меди имеют цвет золота и применяются для изготовления ювелирных и декоративных изделий. К

ним относятся полуомпаки Л80, Л85 и томпаки Л90, Л96. Число в марке латуни соответствует содержанию меди.

Двухфазные ( $\alpha + \beta$ ) – латуни имеют большую прочность  $\sigma_e = 343 - 412$  МПа, но меньшую пластичность  $\delta = 20\%$ . Из латуни Л60 изготавливают трубы, штампованные детали.

*Латуни сложные* (специальные). В специальные латуни помимо цинка вводятся другие элементы. Например, свинец вводится для улучшения обрабатываемости резанием (автоматная латунь ЛС59-1), олово – для повышения сопротивления коррозии в морской воде (морская латунь Л070 - 1), алюминий и никель – для повышения механических свойств (латунь ЛАН59-3-2).

*Бронзы*. Бронзами называются сплавы меди с другими элементами (оловом, алюминием, свинцом, бериллием, кремнием, марганцем, сурьмой, никелем и др.). Цинк может входить в состав бронз в небольших количествах вместе с другими элементами, но не как основной легирующий элемент.

*Бронзы оловянные*. Сплавы меди с оловом называются оловянными бронзами. На диаграмме «медь – олово» (рис. 5.2) область  $\alpha$ -твердого раствора ограничена сплошными и пунктирными линиями. Сплошные линии относятся к равновесным сплавам, прошедшим после литья длительный отжиг, а пунктирные – к литым неотожженным сплавам.

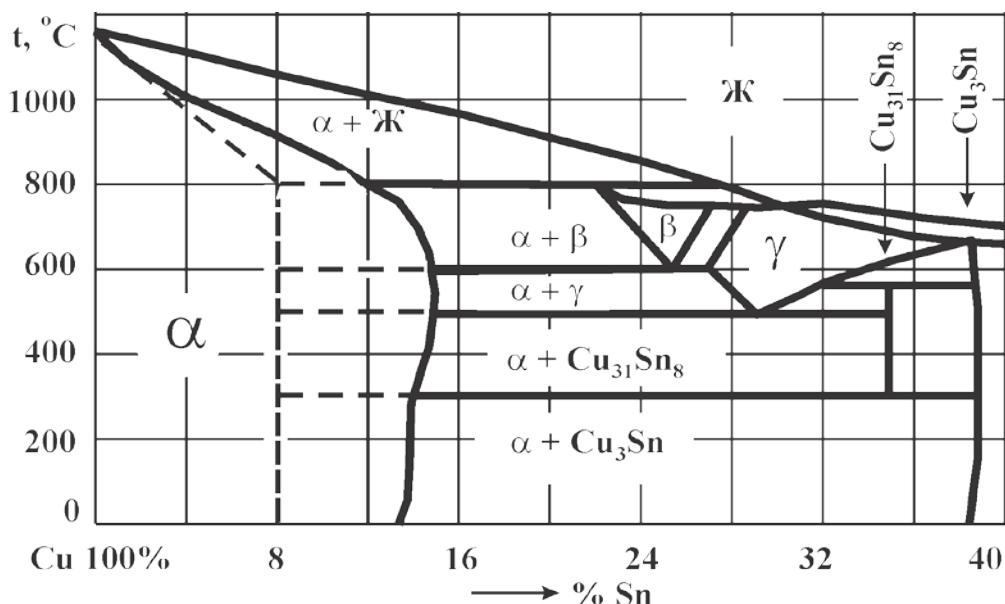


Рис. 5.2. Диаграмма состояния «медь – олово» (фрагмент)

Как видно из диаграммы «медь – олово» (см. рис. 5.2), структура литой бронзы при содержании олова менее 8% состоит из  $\alpha$ -твердого раствора, который представляет собой твердый раствор замещения олова в меди с гранецентрированной кубической решеткой.

Структура литых бронз, содержащих более 8% олова, состоит из первичного  $\alpha$ -твердого раствора и эвтектоида ( $\alpha + \text{CuSn}$ ). Вторая фаза эвтектоида является электронным соединением. В структуре литых бронз эвтектоид состоит из ( $\alpha + \text{CuSn}$ ), а не из ( $\alpha + \text{Cu}_3\text{Sn}$ ), как это следует из равновесной диаграммы, так как эвтектоидный распад  $\text{Cu}_3\text{Sn}_8 \rightarrow \alpha + \text{Cu}_3\text{Sn}$  при  $350^\circ\text{C}$  происходит лишь в равновесных сплавах, прошедших весьма длительный отжиг. В отожженных оловянных бронзах граница между однофазными и двухфазными бронзами соответствует 14% олова.

При увеличении содержания олова повышается прочность оловянных бронз, но уже при содержании олова более 20% прочность резко падает и бронза становится хрупкой из-за большого количества в структуре фазы  $\text{Cu}_3\text{Sn}_8$ . Пластичность оловянных бронз падает уже при содержании в них 5% олова. Оловянные бронзы имеют малую усадку.

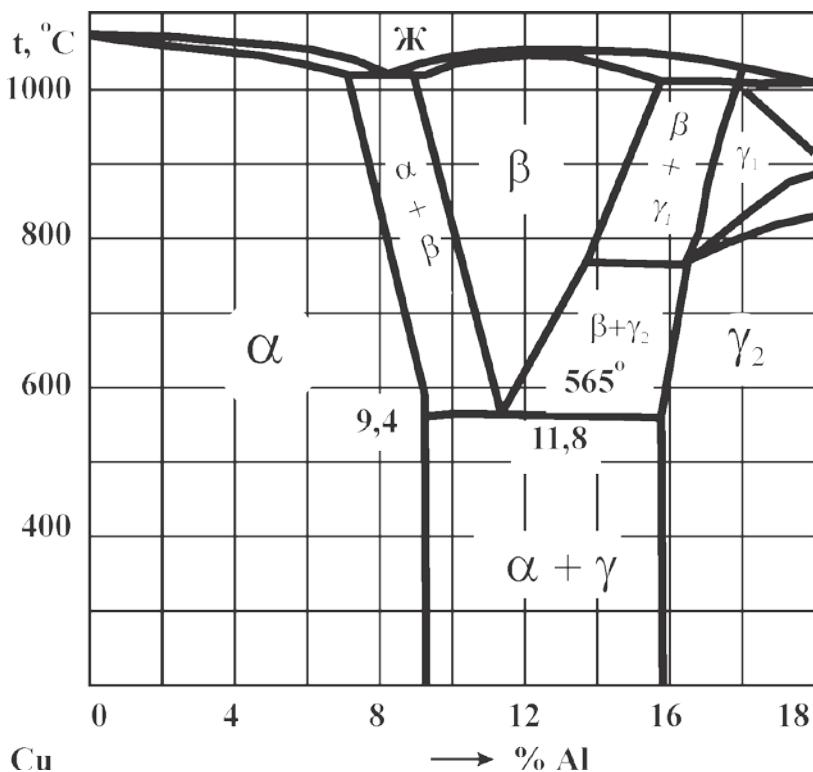


Рис. 5.3. Диаграмма состояния «медь – алюминий» (фрагмент)

Из оловянных бронз изготавливают сложные по конфигурации отливки, в том числе художественное литье. Они хорошо работают на истирание и поэтому бронзы с 10% олова используются как подшипниковые сплавы.

Кроме того, оловянные бронзы обладают высокой химической стойкостью и из них изготавливают паровую и водяную арматуру. Таким образом, основные области применения оловянных бронз – это сложные отливки, вкладыши подшипников, арматура.

Наиболее распространенными оловянными бронзами являются бронзы марок БрО10 (10% Sn), БрОЦС5-5-5 (5% Sn, 5% Zn, 5% Pb).

*Бронзы алюминиевые.* Сплавы меди с алюминием называются алюминиевыми бронзами. Практическое применение имеют сплавы меди с 5–10% алюминия, а также добавками железа, никеля, марганца. В соответствии с диаграммой состояния «медь – алюминий» (рис. 5.3) бронзы при содержании алюминия менее 9,4% состоят из  $\alpha$ -твердого раствора, а при содержании алюминия более 9,4% из  $\alpha$ -твердого раствора и эвтектоида ( $\alpha + \gamma$ ).

Алюминиевые бронзы превосходят оловянные по прочности и химической стойкости. Однофазные бронзы с 4–5% алюминия обладают максимальной пластичностью и невысокой прочностью. Двухфазные бронзы с 10% алюминия имеют максимальную прочность и низкую пластичность. При содержании алюминия более 10% уменьшается прочность бронз, поэтому наиболее часто применяются алюминиевые бронзы с 5–10% алюминия.

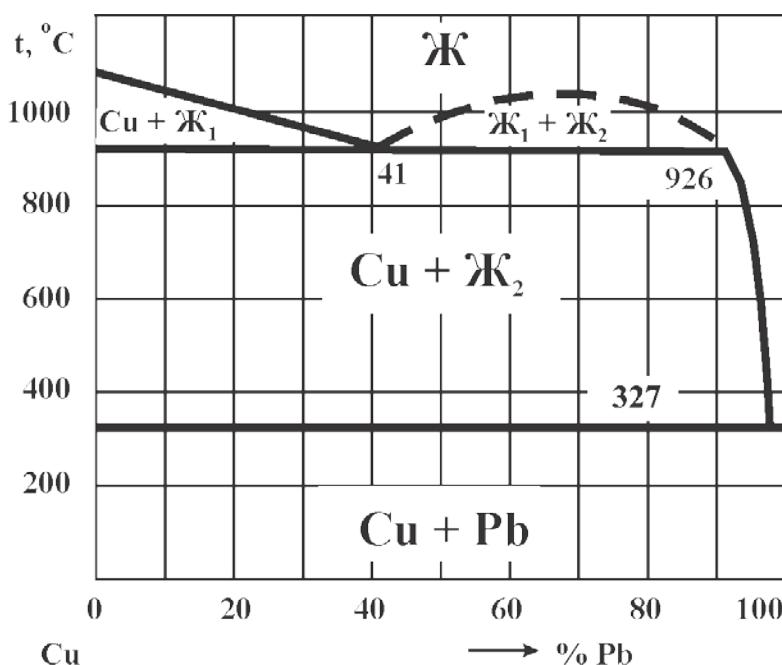


Рис. 5.4. Диаграмма состояния «медь – свинец»

Алюминиевые бронзы кристаллизуются в узком интервале температур, поэтому обладают высокой жидкотекучестью и дают концентрированную усадочную раковину.

*Бронзы свинцовые.* Сплавы меди со свинцом называются свинцовыми бронзами. Из диаграммы состояния «медь – свинец» (рис. 5.4) видно, что свинец не растворяется в меди, и поэтому двойные свинцовые бронзы после затвердевания состоят из кристаллов меди и включений свинца.

Вследствие широкого интервала кристаллизации (954–327 °С) и большой разницы в плотности меди и свинца свинцовые бронзы склонны к ликвации по плотности, которую можно предупредить ускоренным охлаждением отливок.

Значения механических характеристик у двойных свинцовых бронз невысоки. Для повышения механических характеристик и коррозионных свойств в свинцовые бронзы добавляют олово и никель. Эти элементы растворяются в меди, и поэтому структура таких бронз состоит из а-твердого раствора, включений свинца и некоторого количества эвтектоида ( $\alpha + Cu_{31}Sn_8$ ).

Многие промышленные бронзы содержат 5–10% цинка, который в таких количествах полностью растворяется в меди, не влияет на структуру и добавляется для удешевления бронз. Для улучшения обрабатываемости резанием в бронзы добавляют 3–5% свинца. Фосфор устраняет хрупкие включения окиси олова, улучшает литейные свойства, повышает твердость, упругие и антифрикционные свойства.

Все свинцовые бронзы обладают хорошими антифрикционными свойствами.

Кроме того, они имеют высокую теплопроводность (в 4 раза большую, чем у оловянных бронз, и в 6 раз большую, чем у баббитов) и допускают большой нагрев. Поэтому свинцовые бронзы широко используются для изготовления высоконагруженных ответственных подшипников.

Широко применяются деформируемые бронзы БрОС8-12 (8% Sn, 12% Pb), БрС30 (30% Pb), БрОСН10-2-3 (10% Sn, 2% Pb, 3% Ni).

В марках литейных бронз так же, как и у литейных латуней, за каждой буквой ставится содержание этого элемента. Например, бронза БРО10Ц2 содержит 10% Sn и 2% Zn.

## Алюминиевые сплавы

Диаграммы состояния «алюминий – легирующий элемент (ЛЭ)» все одного типа: с ограниченной растворимостью в твердом состоянии с эвтектическим превращением (рис. 5.5).

Однофазные сплавы содержат ЛЭ в количестве, меньшем предела его растворимости при комнатной температуре. Они пластичны в холодном и горячем состоянии, не упрочняются термообработкой.

Если сплав содержит ЛЭ в количестве, большем его растворимости при комнатной температуре, но меньшем максимальной растворимости при высокой температуре, то появляется возможность получить пересыщенный твердый раствор. При этом сплавы остаются достаточно пластичными и могут упрочняться термической обработкой.

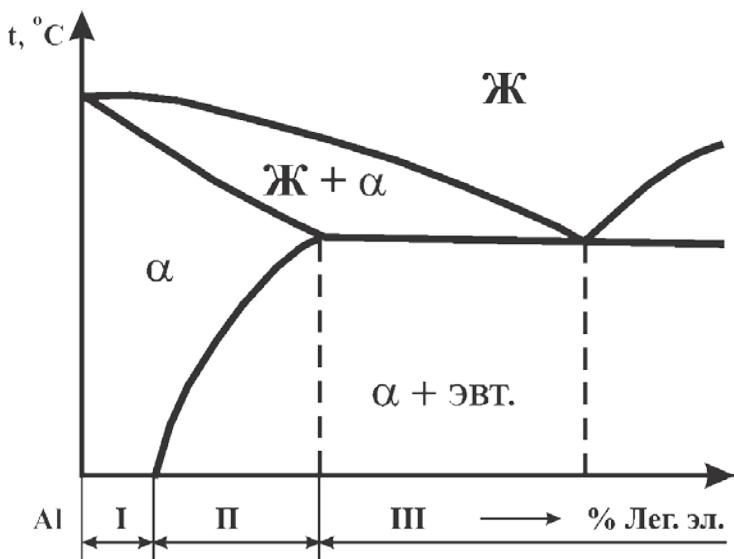


Рис. 5.5. Диаграмма состояния «алюминий – легирующий элемент»: I – деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой; II – деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой; III – литейные сплавы

Если концентрация легирующего элемента превышает его максимальную растворимость в алюминии, то в структуре появляется эвтектика, что повышает жидкотекучесть сплава. Такие сплавы относятся к группе литейных.

### Магниевые сплавы

Сплавы на основе магния обладают более высокими механическими свойствами, чем чистый магний. Повышение прочности достигается за счет образования сложнолегированных твердых растворов и фаз в виде соединений магния с вводимыми добавками.

В качестве легирующих добавок в магниевых сплавах используют до 10% алюминия, до 6% цинка, до 2,5% марганца, до 1,5% циркония. Содержание ЛЭ ограничивается их растворимостью в магнии. Растворимость эта снижается с уменьшением температуры, что позволяет применять для этих сплавов термическую обработку.

Малый удельный вес (до  $1,8 \text{ г}/\text{см}^3$ ) и относительно высокие механические свойства ( $\sigma = 200 - 360 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 6 - 20\%$ ) позволяют использовать магниевые сплавы в качестве конструкционных материалов в различных областях техники.

Способность магниевых сплавов гасить ударные нагрузки делает их хорошим материалом для деталей, подверженных сильным толчкам (колеса самолетов, артиллерийских орудий).

Литейные сплавы маркируются: МЛ5, МЛ10; деформируемые сплавы: МА1, МА14.

## Порядок выполнения работы

Цветные сплавы изучаются качественно с выявлением влияния вводимых элементов на их структуру и свойства.

При выполнении лабораторной работы необходимо:

1. Изучить маркировку цветных сплавов и указать возможность их упрочнения пластической деформацией или термической обработкой.

2. Указать области применения цветных сплавов на основе меди, алюминия, магния.

3. Для изучения микроструктуры цветных сплавов зарисовать их структуры по приведенным рисункам и просматриванию микрошлифов с использованием микроскопа МЕТАМ РВ-21, РВ-22. На рисунках указать фазовый и структурный состав изучаемых сплавов.

Для изучения микроструктуры предлагаются следующие цветные сплавы.

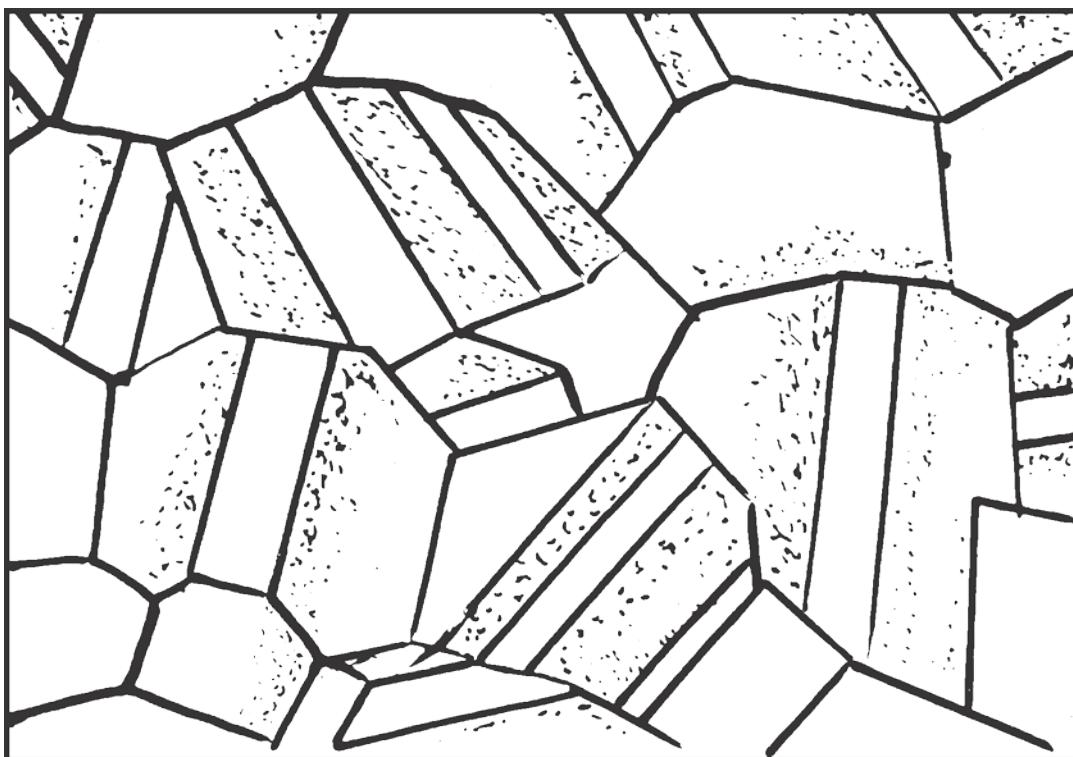


Рис. 5.6. Латунь Л70:  $\alpha$ -фаза с двойниками, x450

*Латунь двойная марки Л70 (70% Cu, 30% Zn). Структура «патронной латуни» после деформации и отжига (рис. 5.6) состоит из зерен  $\alpha$ -твердого раствора. Зерна твердого раствора в пространстве ориентированы по-разному и поэтому разрезаются по разным плоскостям. Вследствие неодинаковости свойств по разным плоскостям и направлениям (анизотропия) зерна реагируют с реактивом по-разному. Зерна, которые сильнее травятся, больше рассеивают свет и будут выглядеть более темными. Внутри зерен*

$\alpha$ -твёрдого раствора видны полосы с иной окраской, ограниченные двумя параллельными линиями. Это так называемые «двойники», появление которых обусловлено деформацией, характерной для металлов и сплавов с кубической гранецентрированной решёткой.

Латунь *автоматная (специальная) ЛС59-1* (59% Cu, 1% Pb, 40% Zn). Структура состоит из  $\alpha$ -твёрдого раствора (светлые участки) и  $\beta$ -твёрдого раствора (темные участки) (рис. 5.7).



Рис. 5.7. Латунь ЛС59-1:  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы и включения свинца,  $\times 450$

Эта латунь является  $(\alpha + \beta)$  - латунью, т.к. содержит более 39% цинка (см. рис. 5.1). В состав латуни ЛС59-1 введен 1% свинца, который в меди не растворяется и поэтому виден как отдельные включения (темные точки). Свинец вводится для уменьшения коэффициента трения между стружкой и резцом; он также делает стружку более ломкой. Это повышает скорость обработки изделий из этой латуни на станках-автоматах.

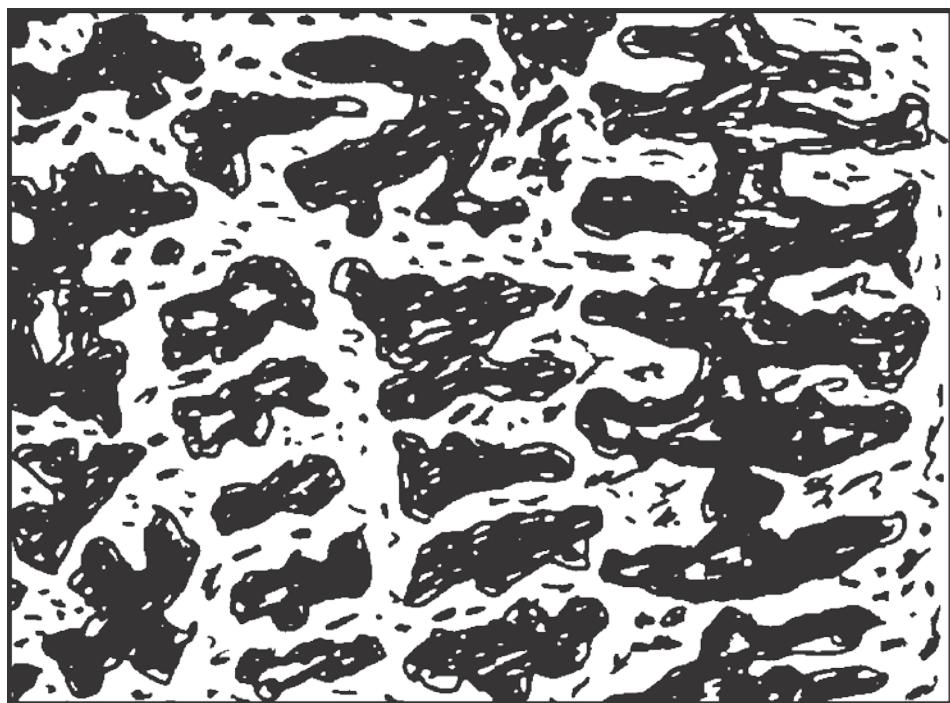


Рис. 5.8. Бронза оловянная БрО16:  $\alpha$ -фаза и эвтектоид

#### *Бронза оловянная БрО16 (16% Sn, 84% Cu)*

Литая бронза является двухфазной. В структуре литой бронзы БрО16 (рис. 5.8) видны дендриты первичного  $\alpha$ -твердого раствора олова в меди, а в междендритном промежутке – эвтектоид ( $\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ ). Дендриты имеют различную окраску в разных точках, что объясняется характерным для литьих оловянных бронз явлением – дендритной ликвацией.

Темные участки дендритов  $\alpha$ -твердого раствора беднее оловом, светлые богаче оловом. Светлые участки в междендритном промежутке представляют собой соединение  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ , входящее в состав эвтектоида, а темные участки –  $\alpha$ -твердый раствор.

Благодаря наличию в структуре мягкого  $\alpha$ -твердого раствора и твердых включений соединения  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  она обладает хорошими антифрикционными свойствами и используется как подшипниковый сплав.

*Алюминиевожелезоникелевая бронза БрАЖН10-4-4 (10% Al, 4% Fe, 4% Ni, 82% Cu).*

Бронза БрАЖН10-4-4 является двухфазной, так как содержание алюминия в ней превосходит 9,4% (см. рис. 5.3).

Структура сплава (рис. 5.9) состоит из  $\alpha$ -твердого раствора (светлые участки) и эвтектоида ( $\alpha + \gamma$ ) темного цвета. В состав этой бронзы введено 4% железа для измельчения зерна и повышения механических и антифрикционных свойств. В связи с тем, что железо в твердом состоянии не растворяется в меди, в структуре видны включения железа в виде темных точек на фоне  $\alpha$ -твердого раствора.

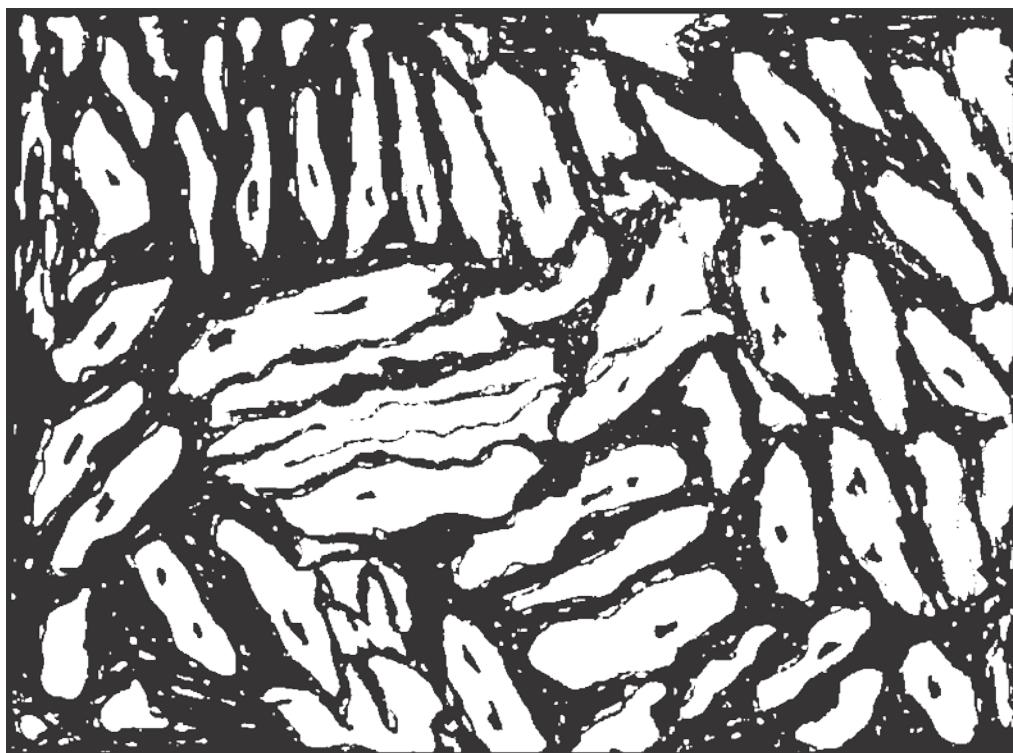


Рис. 5.9. Бронза БрАЖ10-4-4:  $\alpha$ -фаза, эвтектоид и включения железа

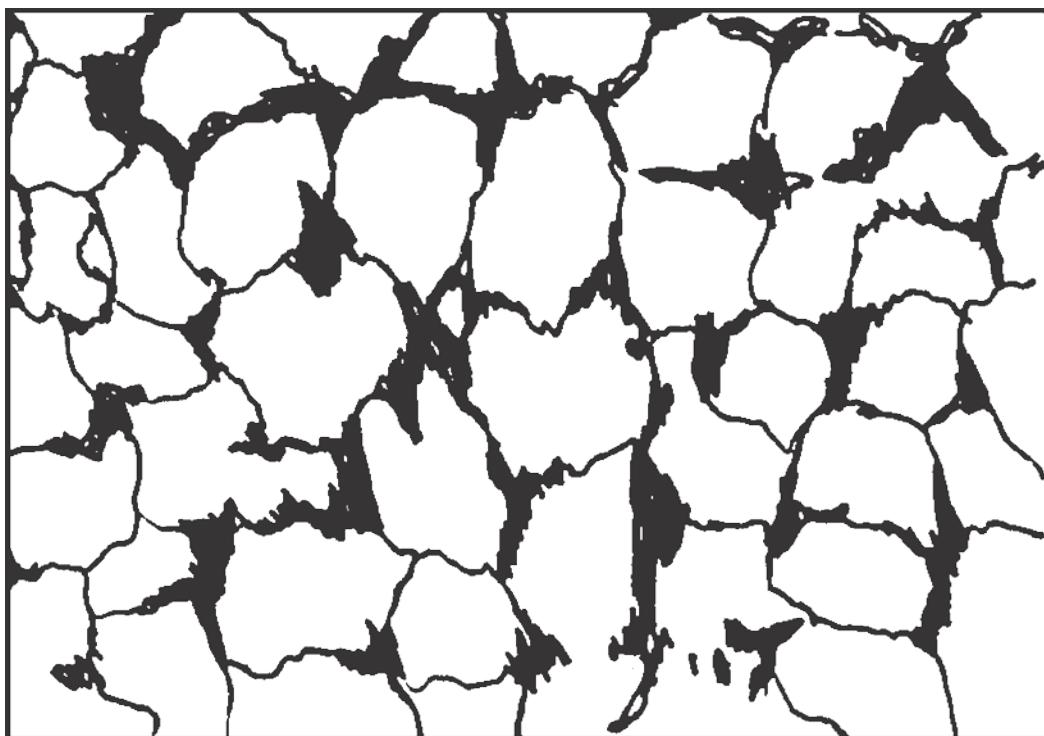


Рис. 5.10. Свинцовая бронза БрС30,  $\times 450$

Для улучшения механических свойств и износостойкости как при низких, так и при высоких температурах ( $500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в бронзу добавляют 4% никеля. Никель в твердом состоянии неограниченно растворяется в меди, поэтому он структурно не проявляется.

Бронза БрАЖН10-4-4 может быть упрочнена термической обработкой, так как при охлаждении от высоких температур с критической скоростью  $\beta$ -фаза превращается в игольчатую структуру. Превращение идет по мартенситному типу. После закалки от 960 °С и отпуска при 400 °С твердость бронзы повышается от НВ 1700–2000 до НВ 4000.

Бронза БрАЖН10-4-4 используется для получения деталей обработкой давлением (прутки, профили, трубы).

#### *Свинцовая бронза БрС30*

Структура состоит из зерен меди (светлые участки) и свинца (темные участки). Свинец располагается по границам зерен меди или в междендритных пространствах (рис. 5.10).

Равномерное распределение свинца в меди обеспечивает высокие антифрикционные свойства сплава.

Бронза БрС30 имеет низкие механические свойства: предел прочности 59 МПа, относительное удлинение 4%. Поэтому ее используют для изготовления биметаллических подшипников, в которых бронза наплавлена тонким слоем на сталь. Такие подшипники просты в изготовлении, имеют небольшой вес, легко заменяются при изнашивании.

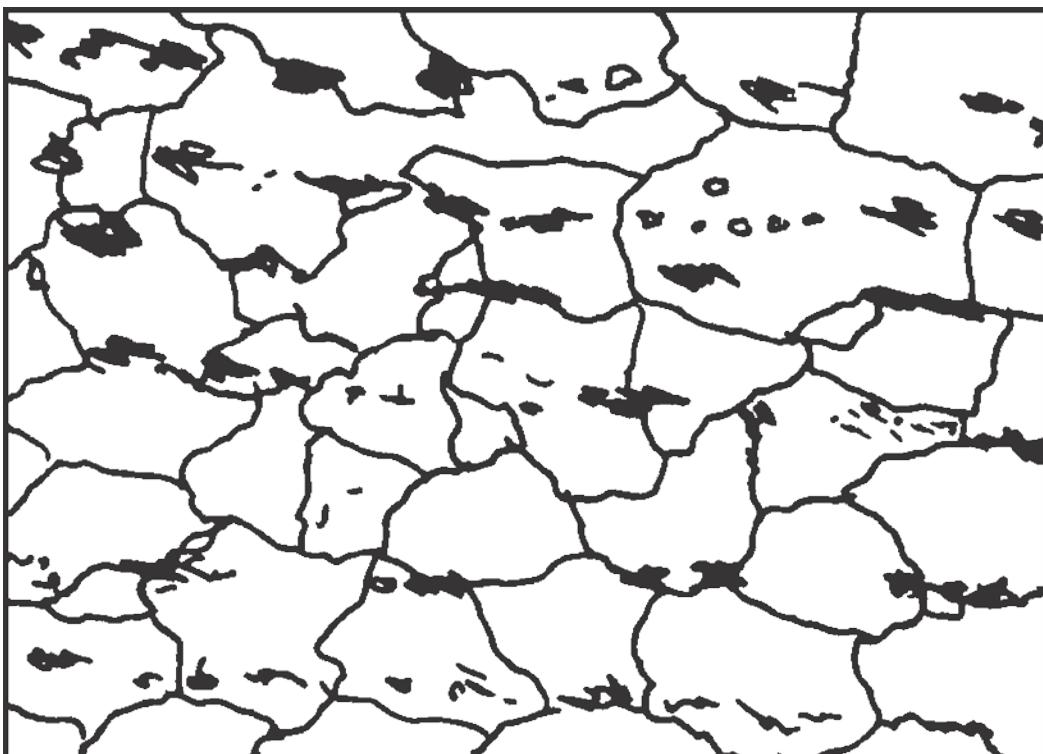


Рис. 5.11. Алюминиевый сплав АК4: медь, свинец,  $\alpha$ -фаза и интерметаллиды, х450

Алюминиевый деформируемый жаропрочный сплав АК4 помимо меди (1,9–2,5%) и магния (1,4–1,8%) содержит никель (0,8–1,4%), железо (0,8–1,4%), кремний (0,5–1,2%). Металлы, входящие в состав сплава, частично растворяются в алюминии, образуя  $\alpha$ -твёрдый раствор. Та часть ле-

гирующих элементов, которая не растворилась в алюминии, образует между собой химические соединения, называемые интерметаллическими соединениями, или интерметаллидами. В сплаве АК4 имеются интерметаллиды: фаза  $S(Al_2CuMg)$ , фаза  $W(Al_xMg_5Si_4Cu_4)$ ,  $Mg_2Si$ . На микрошлифе интерметаллиды видны в виде темных включений, разных по цвету, форме, размерам, вытянутых в цепочки по направлению деформации. Таким образом, структура сплава АК4:  $\alpha$ -твёрдый раствор (белый фон) и интерметаллиды (темные включения), (рис. 5.11). Из сплава АК4 изготавливают детали, работающие при температурах до 350 °С (поршни, головки цилиндров, диски, крыльчатки компрессоров и др.).

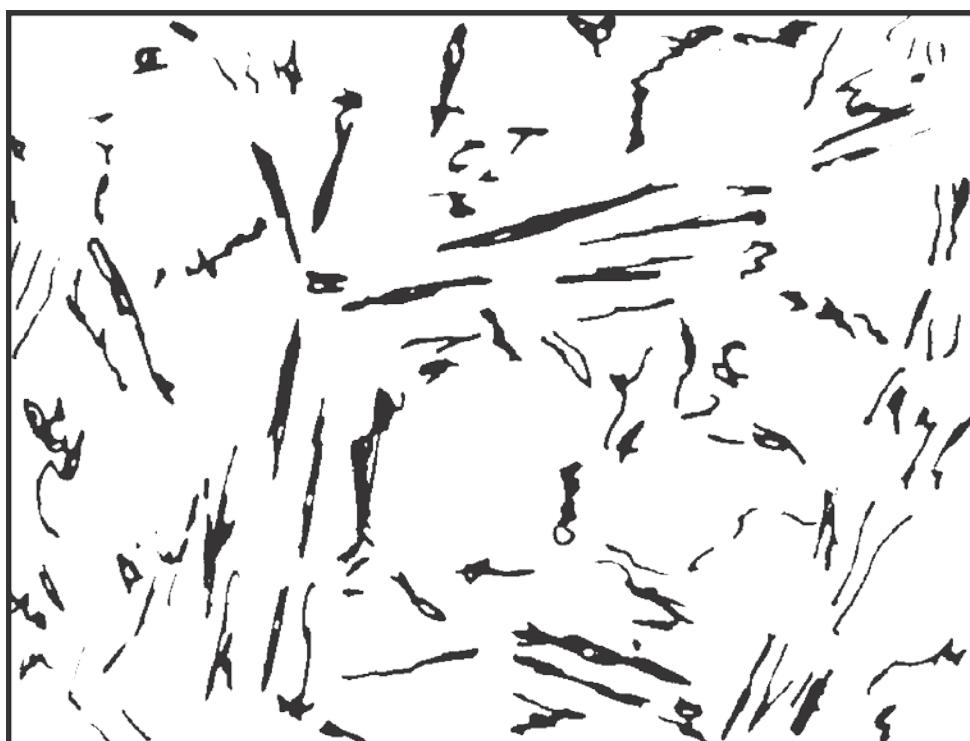


Рис. 5.12. Немодифицированный сплав АЛ4:  $\alpha$ -фаза и грубоигольчатая эвтектика, x450

*Литейный алюминиевый сплав АЛ4 (немодифицированный).* Сплав АЛ4 является доэвтектическим силумином с содержанием 8,0–10,5% кремния, 0,17–0,3% магния, 0,2–0,5% марганца. Немодифицированный сплав имеет в структуре (рис. 5.12) первичный  $\alpha$ -твёрдый раствор (крупные светлые поля) и эвтектику, состоящую из крупных игл кремния (стального цвета на шлифе и темного на схеме) и  $\alpha$ -твёрдого раствора (белые участки между иглами кремния). Особенностью является то, что эвтектический  $\alpha$ -твёрдый раствор сливается с первичным  $\alpha$ -твёрдым раствором (граница между ними не видна).

Грубые крупные иглы кремния играют роль внутренних надрезов в пластичном  $\alpha$ -твёрдом растворе, что снижает механические свойства.

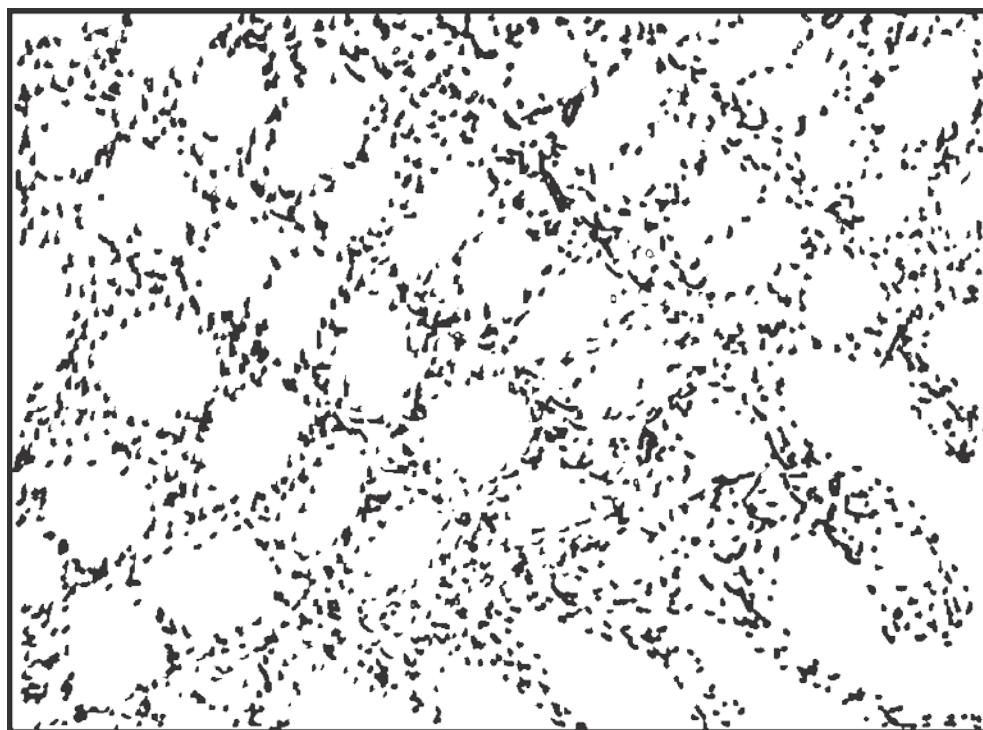


Рис. 5.13. Сплав АЛ4 модифицированный:  $\alpha$ -фаза и эвтектика дисперсная, х450

Немодифицированный сплав АЛ4 имеет предел прочности 147 МПа и относительное удлинение до 2%.

*Литейный алюминиевый сплав АЛ4 (модифицированный).* Улучшение механических свойств сплава АЛ4 достигается модифицированием (введением в жидкий сплав натрия или смеси его солей). Образуется дисперсная эвтектика, что обеспечивает повышение предела прочности до 235 МПа. Модифицированный сплав имеет в структуре (рис. 5.13) дендриты первичного  $\alpha$ -твердого раствора (светлый фон) и мелкие включения кремния (темные включения).

Сплавы АЛ4 применяются для изготовления крупных и сложных по конфигурации отливок, несущих высокие статические и ударные нагрузки. В частности, из сплава АЛ4 отливают картеры и блоки поршневых двигателей внутреннего сгорания.

*Магниевый литейный сплав МЛ5 (после литья).* Структура сплава (рис. 5.14) состоит из тройного  $\delta$ -твердого раствора алюминия и цинка в магнии (светлый фон) и эвтектики ( $\delta + \gamma$ ). Вторая фаза эвтектики – интерметаллическое соединение  $\gamma(\text{Mg}_4\text{Al}_3)$  – расположена в виде ярких белых включений на границах  $\alpha$ -твердого раствора.

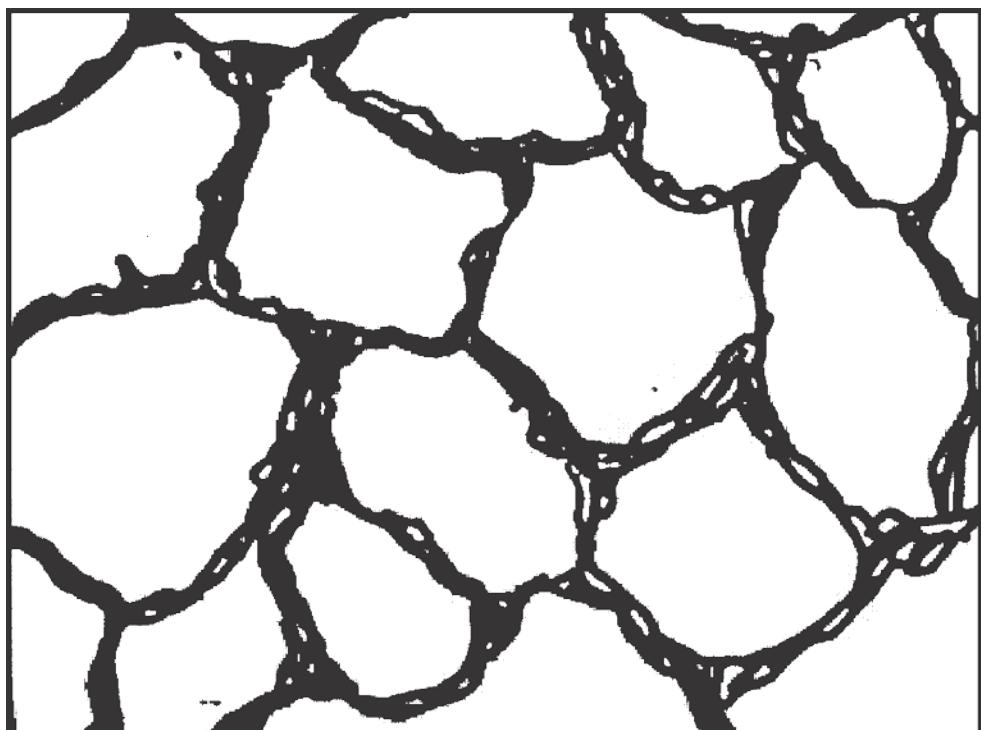


Рис. 5.14. Сплав МЛ5 (после литья):  $\delta$ -фаза и эвтектика,  $\times 450$

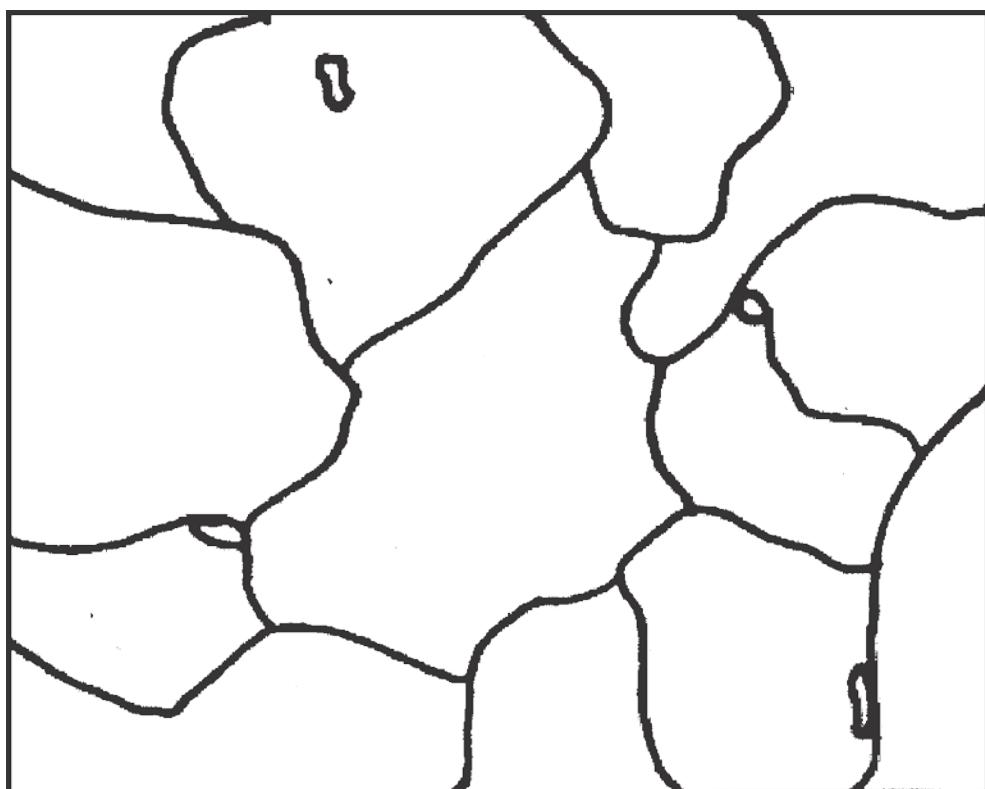


Рис. 5.15. Сплав МЛ5 (после термообработки):  $\delta$ -фаза и включения  $\gamma$ -фазы,  $\times 450$

Сплав МЛ5 после литья имеет низкое значение предела прочности на растяжение до 147 МПа и малое относительное удлинение (2%).

*Магниевый литейный сплав МЛ5 (после закалки).* Для устранения хрупкости сплав МЛ5 подвергается закалке (нагрев до 416 °C, выдержка 16 часов, охлаждение на воздухе). При нагреве под закалку  $\gamma$ -фаза ( $Mg_4Al_3$ ) растворяется в  $\delta$ -твёрдом растворе. Структура сплава после закалки состоит из  $\delta$ -твёрдого раствора (рис. 5.15). По границам зерен кое-где видны остатки нерастворившихся включений  $\gamma$ -фазы ( $Mg_4Al_3$ ). При больших увеличениях внутри и по границам зерен могут быть видны включения марганцовистой фазы.

Сплав МЛ5 после закалки имеет предел прочности 226 МПа и относительное удлинение 5%. Он используется для изготовления нагруженных деталей двигателей (картеры, коробки передач, маслопомпы и т.д.), тормозных барабанов, штурвалов, кронштейнов, деталей приборов, аппаратуры, корпусов и т.д.

### Контрольные вопросы и задания

1. Каковы структура, механические свойства, маркировка, области применения однофазных латуней?
2. Каковы структура, механические свойства, маркировка, области применения двухфазных латуней?
3. Каковы структура, состав, область применения специальной латуни ЛС59-1?
4. Каковы особенности структуры, свойств, маркировки, области применения оловянных бронз?
5. Каковы структура и свойства двойных алюминиевых бронз, а также бронз с добавками железа и никеля? Опишите их маркировку и области применения.
6. Каковы структура, свойства, маркировка и области применения свинцовых бронз?
7. Опишите классификацию алюминиевых сплавов и принципы их маркировки.
8. Приведите пример алюминиевого деформируемого сплава. Опишите состав сплава, особенности структуры, свойства, области применения.
9. Приведите пример литейного алюминиевого сплава. Опишите состав сплава, особенности структуры, свойства, области применения.
10. С какой целью выполняется модифицирование алюминиевых литейных сплавов?
11. Приведите пример магниевого литейного сплава. Опишите его состав и области применения. Каковы структура и свойства сплава после литья и после термической обработки?

## *Лабораторная работа № 6*

### **ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДУРАЛЮМИНА**

**Цель работы:** ознакомиться с основными понятиями термической обработки алюминиевых сплавов. Определить влияние температуры и времени старения закаленного дуралюмина на механические свойства (твердость).

#### **Краткие теоретические сведения**

*Дуралюмин* – сплав алюминия с медью (2,6–4,9%), магнием (0,15–2,7%), марганцем (0,2–1,0%) [1, 2, 3, 4]. Благодаря малому удельному весу и высоким механическим свойствам сплав находит широкое применение во многих отраслях народного хозяйства. В зависимости от химического состава сплавы маркируются буквой Д и цифрой, указывающей на номер сплава (ГОСТ 4784–97), например Д1, Д16, Д18. Химический состав и маркировки по ИСО 209-1-89 представлены в табл. 6.1.

Процессы, протекающие в различных дуралюминах при термической обработке, имеют одинаковую природу и подчиняются одним и тем же законам.

Таблица 6.1

#### **Химический состав алюминиевых сплавов систем «алюминий – медь – магний»**

Химический состав, %, остальное Al									
Маркировка	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Другие
Д1	0,20–0,8	0,7	3,5–4,8	0,40–1,0	0,4–0,8	0,10	0,3	0,15	Ti+Zr 0,20
Д16	0,50	0,5	3,8–4,9	0,30–0,9	1,2–1,8	0,10	0,25	0,15	Ti+Zr 0,20
Д16ч	0,20	0,3	3,8–4,9	0,30–0,9	1,2–1,8	0,10	0,25	0,15	–
Д18	0,20	0,3	3,8–4,9	0,30–0,9	1,2–1,8	0,10	0,25	0,15	–
Д19	0,5	0,5	3,8–4,3	0,5–1,0	1,7–2,3	–	0,1	0,1	Be 0,0002–0,005
Д19ч	0,2	0,3	3,8–4,3	0,4–0,9	1,7–2,3	–	0,1	0,1	Be 0,0002–0,005
B65	0,2	0,2	3,9–4,5	0,3–0,5	0,15–0,3	–	0,1	–	–
ВД17	0,3	0,3	2,6–3,2	0,4–0,7	2,0–2,4	–	0,1	0,1	–

## Отжиг дуралюмина

Из диаграммы «алюминий – медь» (рис. 6.1) видно, что растворимость меди в алюминии изменяется от 0,2 при 0 °С до 5,65% при 548 °С. Это обстоятельство позволяет получить пересыщенные твердые растворы меди в алюминии по механизму замещения.

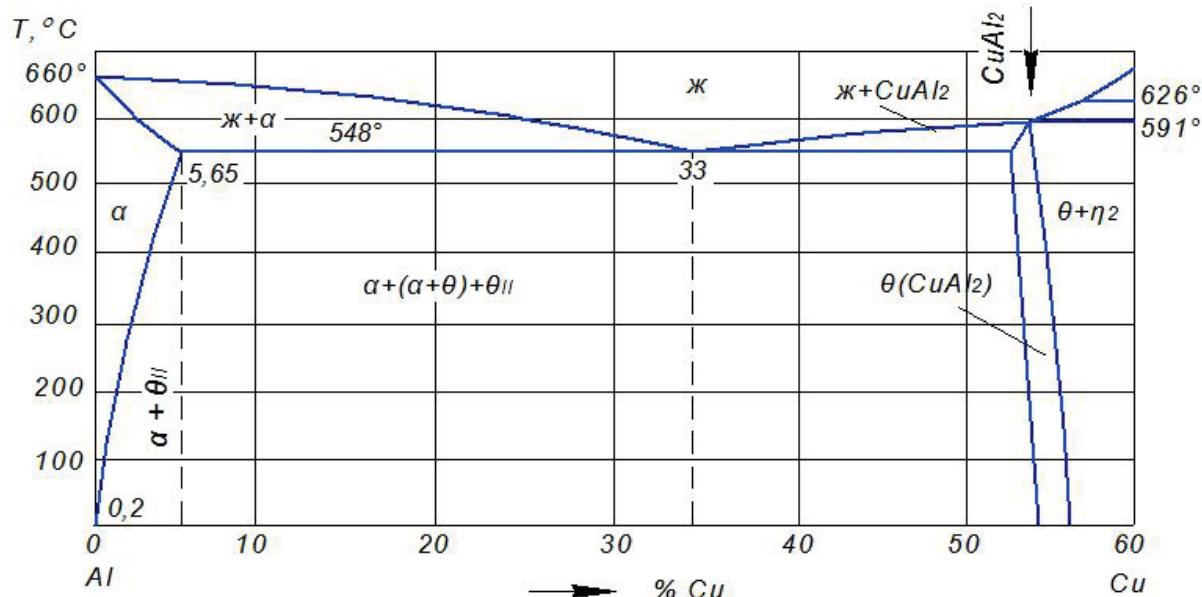


Рис. 6.1. Диаграмма состояния сплавов системы «алюминий – медь»

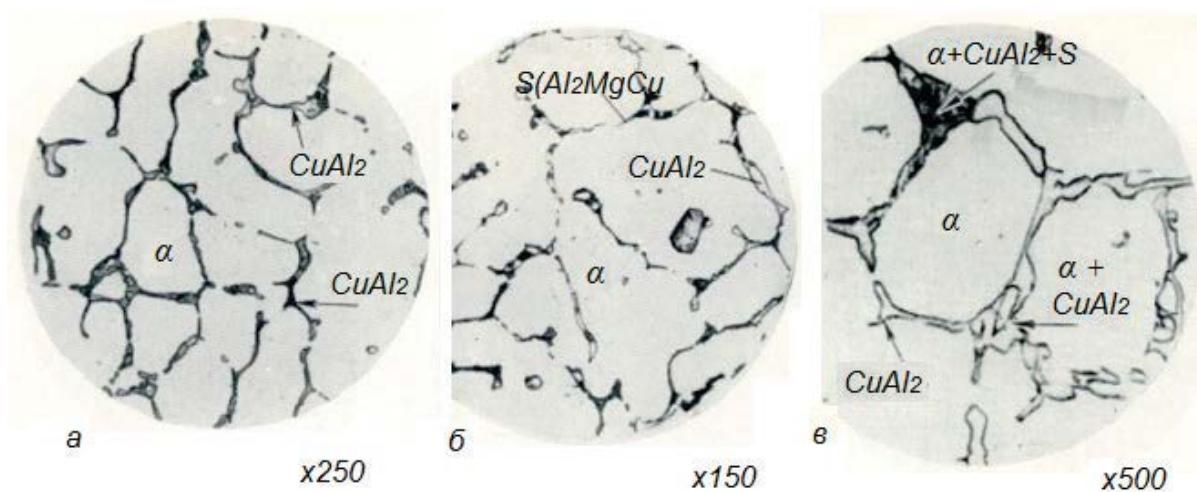


Рис. 6.2. Микроструктура литого дуралюмина марок Д1 (а) и Д16 (б, в)

Структура дуралюминов после литья представляет собой неоднородный твердый раствор и выделения хрупких неравновесных эвтектических включений CuAl<sub>2</sub> (θ-фаза), Al<sub>2</sub>CuMg (S-фаза), Al<sub>6</sub>CuMg<sub>4</sub> (T-фаза) и др. по границам зерен и между ветвями дендритов. Для устранения дендритной ликвации слитки перед обработкой давлением подвергают гомогенизационному отжигу. В процессе гомогенизации состав зерен твердого раствора

выравнивается, а интерметаллиды растворяются. В процессе последующего охлаждения интерметаллиды выделяются в виде равномерно распределенных мелких вторичных включений (рис. 6.2).

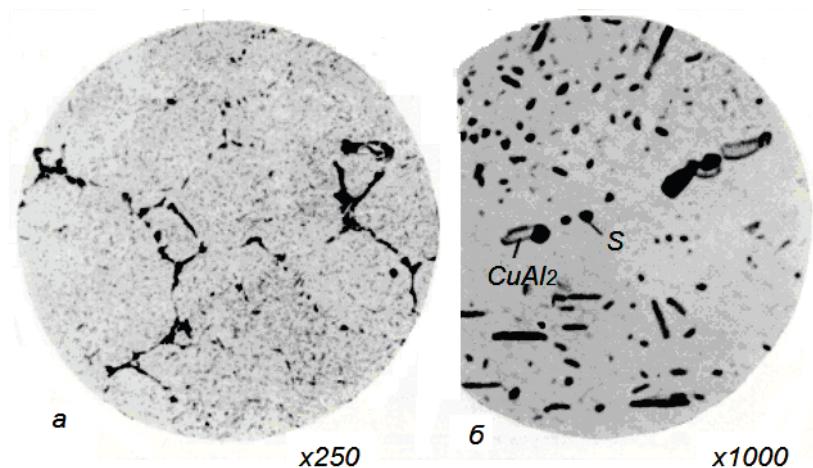


Рис. 6.3. Микроструктура сплава Д16 после гомогенизационного отжига (*а*), после деформации и отжига (*б*)

Вследствие этого пластичность литого сплава повышается, что позволяет увеличить степень обжатия при горячей обработке давлением, скорость прессования и уменьшить технологические отходы. Гомогенизация способствует получению мелкозернистой структуры в отожженных листах и уменьшает склонность к коррозии под напряжением. Температура гомогенизации лежит несколько ниже неравновесного солидуса, и для наиболее распространенных сплавов составляет 480–520 °С. Выдержка колеблется от 6 до 40 ч. Охлаждение проводят на воздухе или вместе с печью. Микроструктура сплава после гомогенизации представлена на рис. 6.3, *а*.

Для снятия наклепа и получения мелкого зерна применяется рекристаллизационный отжиг, заключающийся в нагреве деформированного сплава до температур выше температуры окончания первичной рекристаллизации. При нагреве деформированных металлов и сплавов до температуры рекристаллизации в них начинается процесс образования и роста новых зерен с совершенной кристаллической структурой (рис. 6.3, *б*). Все свойства деформированного металла в результате рекристаллизации меняются в направлении, обратном тому, в каком они менялись при холодной деформации: прочность и твердость уменьшаются, а пластичность растет.

Для большинства алюминиевых сплавов при степени деформации 50–70% температура начала рекристаллизации находится в пределах 280–300 °С. Температура рекристаллизационного отжига в зависимости от состава сплава колеблется от 300 до 500 °С (высокий отжиг) с выдержкой 0,5–3,0 ч. Для сплавов, упрочняемых термической обработкой, скорость охлаждения до 200–250 °С должна быть ~30 °С /ч.

## Закалка и старение дуралюмина

Наличие переменной растворимости меди и магния в алюминии дает возможность применить к дуралюминам закалку со старением.

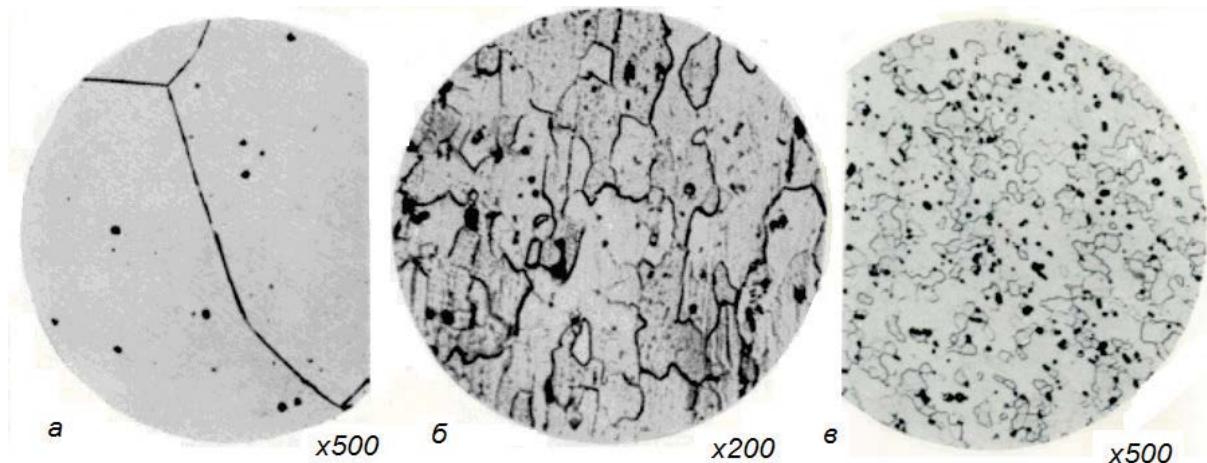


Рис. 6.4. Структура сплава Д16 после закалки (а), естественного старения (б) и искусственного старения (в)

Нагрев сплавов выше линии сольвус с непродолжительной выдержкой и быстрое охлаждение в воде фиксируют пересыщенный твердый раствор меди и магния в решетке алюминия (рис. 6.4, а). Атомы легирующих элементов будут статистически равномерно распределены по объему сплава.

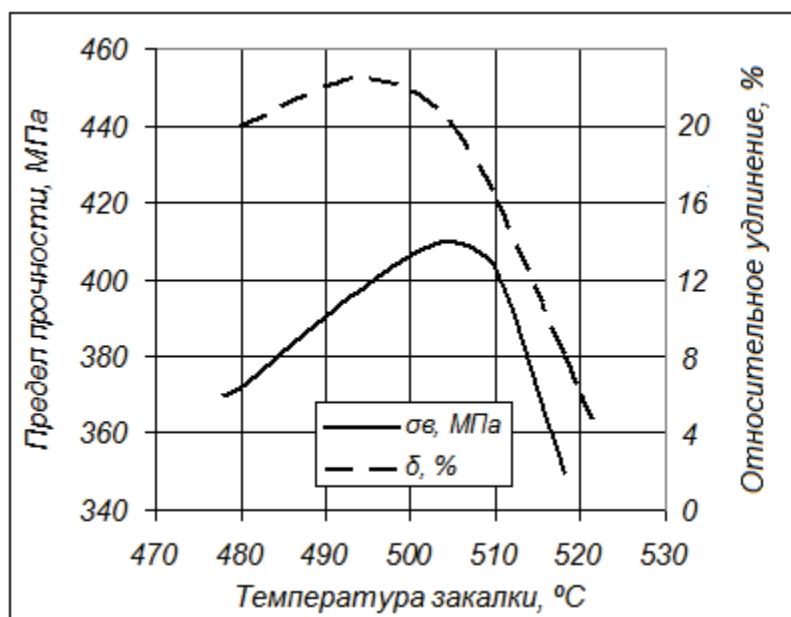


Рис. 6.5. Влияние температуры закалки на механические свойства дуралюмина

В отличие от стали закалка дуралюмина не изменяет существенно его твердости и прочности, а пластичность даже повышается (рис. 6.5). Это обусловлено типом твердого раствора. Искажения кристаллической решетки при замене атомов растворителя атомами растворяемого вещества хотя и существуют, но не оказывают значительного влияния на движение дислокаций. Однако с течением времени сплавы упрочняются. Длительность этого периода зависит от степени легирования сплава медью и магнием. Так, для сплава Д1 длительность составляет 2 ч после закалки, для Д16 – до 30 мин, для Д18 – 3 и более часов, а сплав В65 – практически не упрочняется.

Таблица 6.2

**Продолжительность нагрева дуралюмина при закалке**

Толщина материала, мм	В селитровых ваннах, мин	Толщина материала, мм	В воздушных камерных печах, мин
До 0,8	5	До 0,8	10
0,8–1,5	7	0,8–1,5	20
1,5–2,5	7	1,5–3,0	30
2,5–5,0	10	3,0–5,0	40
6,0–12	15	5,0–6,0	50

Нагрев под закалку проводится в электропечах с принудительной циркуляцией воздуха. Время выдержки приведено в табл. 6.2. В качестве охлаждающей среды применяется вода с температурой не выше 30–40 °С для тонкостенных изделий и подогретая до 60–80 °С – для толстостенных. Более высокая температура охлаждающей среды в последнем случае необходима для предупреждения трещин и уменьшения внутренних напряжений.

Большое влияние на показатели прочности алюминиевых сплавов оказывает время перенесения изделий из печи в охлаждающую среду и температура закалки. Промежуток времени от выемки изделий из печи до погружения в воду не должен превышать 30 с. Температуры закалки не должны превышать указанных в табл. 6.3. Это связано с оплавлением участков эвтектики по границам зерен, окислением этих границ и другими структурными изменениями, происходящими со сплавами при повышенных температурах (см. рис. 6.5).

В зависимости от состава дуралюмина через 20–120 мин начинается заметное повышение твердости. При комнатной температуре процесс старения особенно интенсивно протекает в течение первых суток и практически заканчивается спустя 4–5 дней, после чего прочность дуралюмина становится наиболее высокой.

Изменение свойств закаленных сплавов, происходящих при комнатной температуре без заметного изменения микроструктуры, называют *естественным старением*.

Таблица 6.3

## Режимы термической обработки

Марка сплава	Закалка		Старение			Отжиг	
	Температура нагрева, °C	Охлаждающая среда	Температура нагрева, °C	Время старения	Охлаждающая среда	Температура нагрева, °C	Охлаждающая среда
Д1	495–510	Вода	Комнатная	Не менее 4 сут	Воздух	1) 390–430, охлаждение до 260–270 (30 °C/ч) 2) 350–370	Воздух
Д16	495–505	Вода	Комнатная	Не менее 4 сут	—	390–430, охлаждение до 250–270 (30 °C/ч)	Воздух
			190 (для профилей)	6 ч		—	
			125–135 (для листов)	20 ч		—	
Д18 П	495–515	Вода	Комнатная	Не менее 4 сут	Воздух	340–370	Воздух
В65	515–520	Вода	75±5	24 ч	—	—	—
ВД17	500±5	Вода	170±5	16 ч	—	—	—

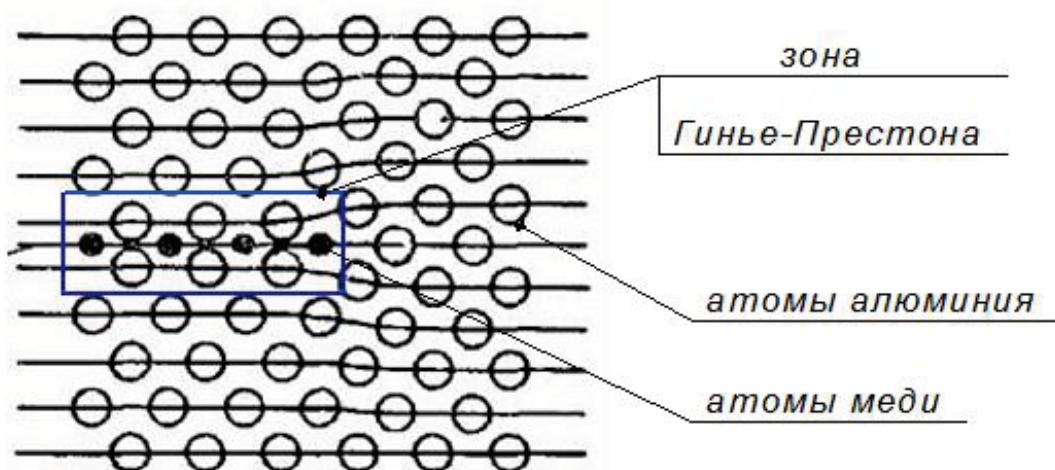


Рис. 6.6. Зона ГП в алюминиевом сплаве

Каких-либо изменений во внутреннем строении сплава с помощью оптического микроскопа обнаружить не удается (рис. 6.4, б). И только рентгеноструктурный анализ указывает на образование в состаренном сплаве областей твердого раствора, обогащенных медью. Эти области называются зонами Гинье–Престона (ГП). В зависимости от соотношения размеров атомов алюминия и легирующих элементов зоны могут иметь форму дисков или сфер и когерентно связаны с матрицей (рис. 6.6).

Различаются зоны ГП-1 и ГП-2. Первые имеют меньшие размеры (толщиной 0,5–1 нм и протяженностью 1–10 нм) с хаотичным расположением атомов легирующего компонента. У зон ГП-2 размеры значительно больше (толщина 1–4 нм и диаметр 20–30 нм) и взаимное расположение атомов алюминия и легирующего элемента упорядоченное.

Атомный диаметр меди на 10% меньше, чем у алюминия, и потому плоскости, заполненные атомами алюминия, смещены в сторону плоскости, состоящей из атомов меди, т. е. решетка упруго искажена. Зоны ГП образуются за счет процессов диффузии.

Образование зон Гинье–Престона – процесс затухающий. Это связано с аннигиляцией вакансий и искажением кристаллической решетки. Как правило, естественное старение завершается через 96 ч.

Повышение температуры значительно сокращает продолжительность старения. Упрочнение закаленного сплава при температурах выше 100 °С называется *искусственным старением*. При искусственном старении образуются промежуточные фазы  $\theta''$  и  $\theta'$  с соотношением атомов Cu: Al = 1 : 2, т. е. таким же, как в стабильной фазе.

Фаза  $\theta''$  имеет тетрагональную решетку, полностью когерентную с матрицей (т. е. один из слоев принадлежит и матрице, и  $\theta''$ -фазе). По плоскостям, заполненным только атомами меди, из-за размерного несоответствия атомов меди и алюминия возникают сильные упругие искажения матрицы. Частицы  $\theta''$ -фазы во много раз крупнее зон ГП и достигают толщины 10,0 нм и диаметра 150,0 нм.

При температуре 200 °С более устойчива  $\theta'$ -фаза, которая также имеет тетрагональную решетку, но лишь частично когерентную с матрицей. Это значит, что поле упругих искажений вокруг таких выделений слабее. Размер частиц этой фазы превосходит примерно в два раза размер частиц  $\theta''$ .

Дальнейшее повышение температуры приводит к переходу метастабильной  $\theta'$ -фазы в стабильную  $\theta$ -фазу ( $CuAl_2$ ) и к коагуляции частиц последней. Образование частиц  $\theta$ -фазы обнаруживается при помощи оптического микроскопа (рис. 6.4, в). Некоторые данные, характеризующие изменение прочности в зависимости от температуры старения и времени выдержки, приведены на рис. 6.7.

Можно указать три главные причины упрочнения в результате закалки и старения:

- 1) торможение дислокаций полем упругих напряжений в матрице вокруг выделений;
- 2) упрочнение за счет торможения дислокаций при перерезании частиц;
- 3) упрочнение при обходе частиц дислокациями.

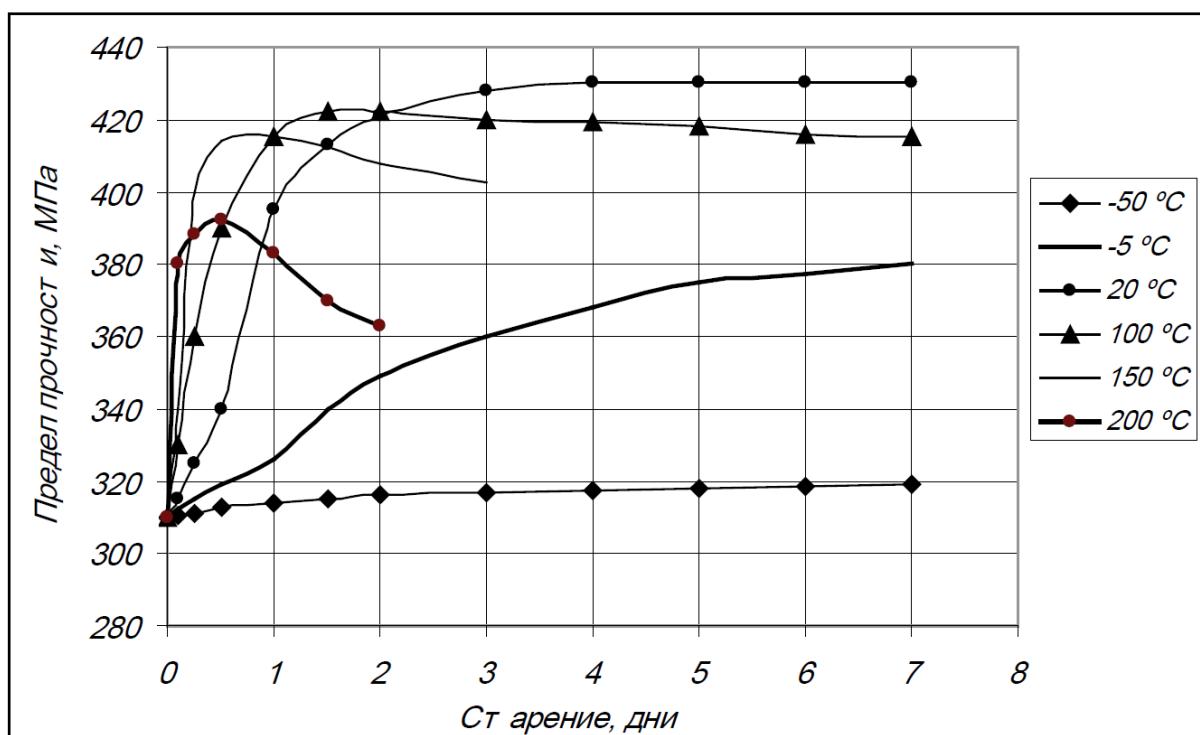


Рис. 6.7. Изменение прочности дуралюмина при различных температурах старения

Размер и плотность распределения частиц оказывают решающее влияние на их взаимодействие с дислокациями.

### Порядок выполнения работы

1. Произвести закалку образцов из дуралюмина.

Нагрев под закалку тщательно контролировать. Это вызвано тем, что закалочные температуры близки к линии солидус и, следовательно, есть опасность оплавления.

2. Произвести старение закаленных образцов по шести режимам (по три разных выдержки при 100 и 200 °C).

3. Определить твердость образцов дуралюмина по шкале «В» прибора ТК-2. Для этого установить нагрузку 100 кгс, а в качестве индентора – стальной шарик диаметром 1/16" (1,588 мм).

4. Построить кривые зависимости твердости от вида термической обработки по образцам №1, 2, 5, 7, 10.

5. Построить кривые зависимости твердости от температуры и времени старения в координатах «твердость – время».

6. Основываясь на теоретическом материале, объяснить зависимости (графики).

Схема отчета по лабораторной работе имеет вид, представленный ниже.

### *Термическая обработка дуралюмина*

1. Цель работы.

Исследованию подвергались образцы

марка \_\_\_\_\_,

химический состав \_\_\_\_\_.

2. Диаграмма состояния сплавов системы «алюминий – медь».

3. Рекомендованные режимы термической обработки для образцов алюминиевого сплава (занести в табл.6.4).

Таблица 6.4

#### **Рекомендованные режимы термической обработки**

Вид термической обработки	Температура нагрева, °C	Время выдержки	Охлаждающая среда
Гомогенизационный отжиг			
Рекристаллизационный отжиг			
Закалка			
Старение			

4. Измерение твердости образцов дуралюмина в процессе термической обработки (занести в табл.6.5).

Таблица 6.5

#### **Измерение твердости образцов дуралюмина**

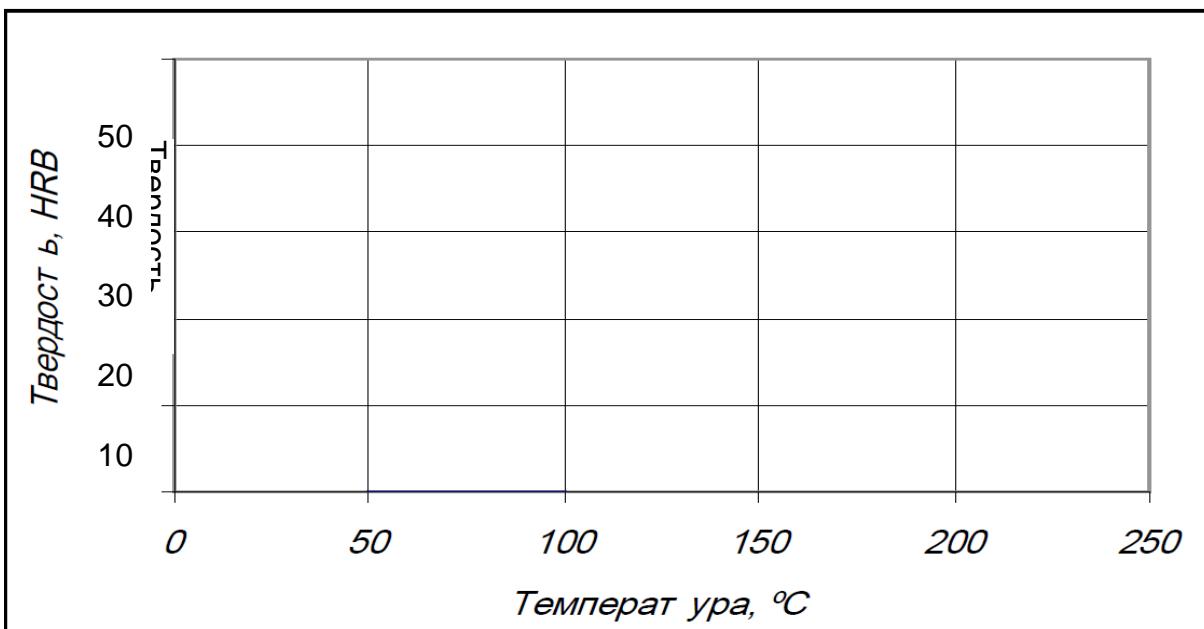
Номер образца	Вид термической обработки	Температура нагрева, °C	Время выдержки	Охлаждающая среда	HRB
1	Отжиг				
2	Закалка				
3	Закалка + естественное старение	20	1 день		
4		20	5 дней		
5	Закалка + искусственное старение	100	5 мин		
6			10 мин		
7			20 мин		
8		200	5 мин		
9			10 мин		
10			20 мин		

5. Влияние вида термической обработки на твердость образцов:  
образцы № \_\_\_\_\_



Объяснение полученных результатов

6. Влияние температуры искусственного старения и времени выдержки на твердость.



Объяснение полученных результатов

## **Контрольные вопросы и задания**

1. Дайте характеристику дуралюминов (система компонентов, химический состав, структура после литья, отжига, закалки, естественного старения, искусственного старения, механические свойства, маркировка).
2. Объясните процессы, происходящие в структуре дуралюминов при отжиге.
3. Какие существуют виды и режимы отжигов, применяемых при обработке дуралюминов?
4. Назовите процессы, на которых основана закалка дуралюминов.
5. Каковы режимы закалки для различных марок дуралюминов?
6. Объясните, каким образом можно предотвратить естественное старение дуралюмина?
7. Перечислите процессы, протекающие при естественном и искусственном старении.
8. Объясните, каким образом можно разупрочнить дуралюмин, который был упрочнен закалкой и естественным старением?

## **Лабораторная работа № 7**

### **ИЗУЧЕНИЕ ОПЕРАЦИЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ**

**Цель работы:** ознакомление с процессом листовой штамповки, ее основными операциями и выполнение расчета операций вырубки и вытяжки.

#### **Содержание работы**

1. Ознакомление с основными операциями листовой штамповки.
2. Проведение расчетов и эксперимента по операции вырубки заготовки для детали типа «стаканчик» (колпачок).
3. Выполнение расчетов и эксперимента по операции вытяжки при изготовлении этой детали.

#### **Общие сведения о процессах листовой штамповки**

Листовая штамповка – это метод изготовления плоских и объемных полых изделий из листового материала путем пластического деформирования [5].

Листовая штамповка является прогрессивным высокопроизводительным способом получения деталей сложной формы с тонкими стенками. Она применяется при изготовлении деталей мотоциклов, велосипедов, рам и кузовов автомобилей, деталей приборов, самолетов, железнодорожных вагонов, речных и морских судов и т. д. Широкое применение листо-

вой штамповки обусловлено ее существенными достоинствами: возможностью изготовления жестких, прочных тонкостенных деталей как простой, так и сложной формы, высокой производительностью, высокой точностью получаемых размеров, высоким коэффициентом использования материала заготовки, низкой себестоимостью штамповых деталей, благоприятными условиями для механизации и автоматизации процесса.

В зависимости от толщины деформируемых заготовок применяют холодную или горячую штамповку. Тонкие листовые металлы (толщиной до 10 мм) подвергаются холодной листовой штамповке, заготовки с большей толщиной проходят горячую штамповку.

При горячей деформации сопротивление металла деформированию примерно в 10 раз меньше, а его пластичность заметно выше, чем при холодной пластической деформации.

При холодной пластической деформации металла возникает наклеп. *Наклеп* – это упрочнение металла с одновременным снижением его пластичности. Наклеп появляется только при холодной деформации, при горячем деформировании он отсутствует.

При необходимости, наклеп может быть устранен последующим отжигом.

Схемы основных операций листовой штамповки приведены в табл. 7.1.

Все операции листовой штамповки можно разделить на две группы: *разделительные* и *формоизменяющие*. При разделительных операциях происходит отделение одной части металла от другой по замкнутому или незамкнутому контуру. Основные операции этой группы – отрезка, вырубка, пробивка, надрезка, обрезка.

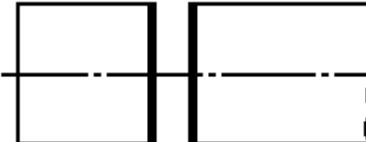
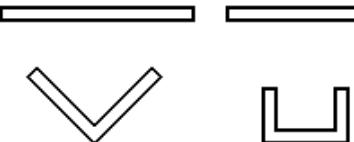
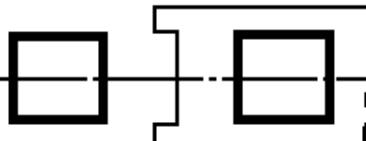
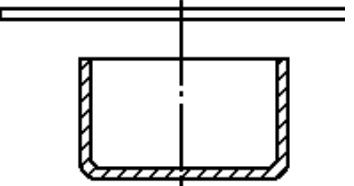
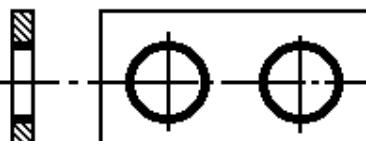
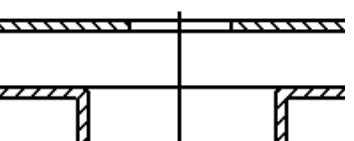
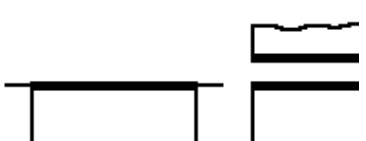
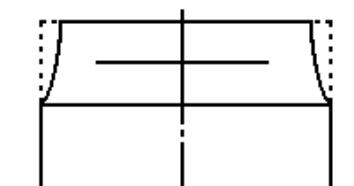
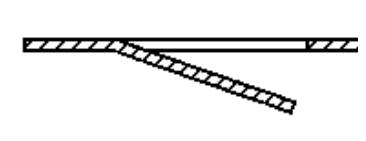
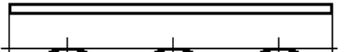
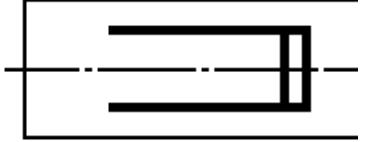
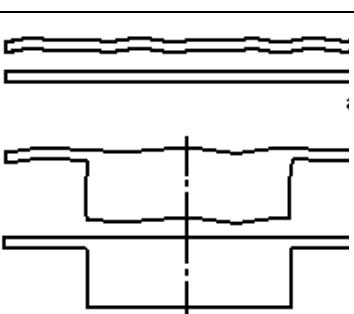
*Отрезка* – это отделение части заготовки по незамкнутому контуру. Обычно ее применяют как заготовительную операцию для разделения листов на полосы нужных размеров.

*Вырубка* – это отделение одной части заготовки от другой по замкнутому контуру при помощи штампа, причем отделяемая часть является деталью. Вырубкой получают наружный контур детали.

*Пробивка* – это операция отделения в штампе одной части заготовки от другой по замкнутому контуру, при этом отделяемая часть удаляется в отход. При пробивке оформляют внутренний контур детали. Характер деформации при вырубке и пробивке практически одинаков, эти операции отличаются только назначением.

Таблица 7.1

## Схемы основных операций листовой штамповки

Наименование операций	Схемы операций	Наименование операций	Схемы операций
Отрезка		Гибка	
Вырубка		Вытяжка	
Пробивка отверстий		Отбортовка отверстий	
Обрезка		Обжимка	
Надрезка		Рельефная формовка	
		Правка: а) плоская; б) пространственная	

*Надрезка* – это частичное отделение части заготовки по незамкнутому контуру, при этом разделяемые части не теряют связи между собой.

*Обрезка* является операцией отделения краевой части полого пространственного изделия, чаще всего полученного при операции вытяжки.

Целью операции обрезки является обеспечение заданной, постоянной по периметру высоты детали.

При проведении формоизменяющих операций листовой штамповки заготовки подвергаются пластической деформации, но этот процесс не сопровождается разрушением (разрезанием) металла. К этой группе операций относятся гибка, вытяжка, отбортовка, обжимка, формовка, правка.

*Гибка* – это операция, изменяющая кривизну заготовки без изменения ее линейных размеров.

*Вытяжка* – операция, превращающая плоскую заготовку в полое пространственное изделие при уменьшении периметра вытягиваемой заготовки.

*Отбортовкой* отверстий называют операцию образования бортов (горловины) вокруг отверстия путем выдавливания центральной части заготовки с предварительно пробитым отверстием.

*Обжимка* (обжим) представляет собой операцию, при помощи которой уменьшают диаметр открытой краевой части полой пространственной заготовки.

*Формовка* является штамповой операцией, при которой изменяется форма заготовки в результате растяжения отдельных ее участков. В большинстве случаев формовке подвергают плоские листовые заготовки с целью получения на них ребер жесткости, местных выступов и т. д.

*Правка* применяется для исправления неровностей поверхности и придания более точных размеров деталям, полученным путем листовой штамповки. Плоские детали из тонкого металла правят в плоских штампах.

### Проведение расчетов и эксперимента по операции вырубки заготовки для детали типа «стаканчик» (колпачок)

#### *Расчет диаметра заготовки*

По методу равенства площади готовой детали (рис. 7.1) и исходной заготовки должны быть равны. Отсюда диаметр плоской заготовки  $D_3$  рассчитывается по формуле

$$D_3 = \sqrt{d_{cp}^2 + 4 \cdot d_{cp} \cdot (h + \Delta h)}.$$

Здесь  $h = 12$  мм – высота детали;  $d = 30$  мм – внутренний диаметр цилиндра;  $S = 1$  мм – толщина листового металла;  $d_{cp} = d + S$  – средний диаметр цилиндра, мм;  $\Delta h$  – припуск на подрезку верхнего края цилиндра, мм.

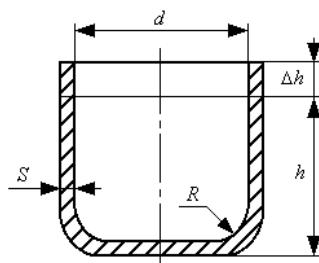


Рис. 7.1. Чертеж готового изделия

Таблица 7.2

**Величина припуска  $\Delta h$ , мм**

Высота изделия $h$ , мм	Относительная высота изделия $h/d$			
	0,5–0,8	0,8–1,6	1,6–2,5	2,5–4,0
	Величина припуска			
10	1,0	1,2	1,5	2,0
20	1,2	1,6	2,0	2,5
30	2,0	2,5	3,3	4,0

Величина припуска  $\Delta h$  зависит от вида деформируемого материала, формы и высоты изделия и определяется по табл. 7.2.

### Определение номинальных размеров рабочих частей вырубного штампа

Расчетная схема и эскиз сборочного чертежа вырубного штампа показаны на рис. 7.2 и 7.3 соответственно.

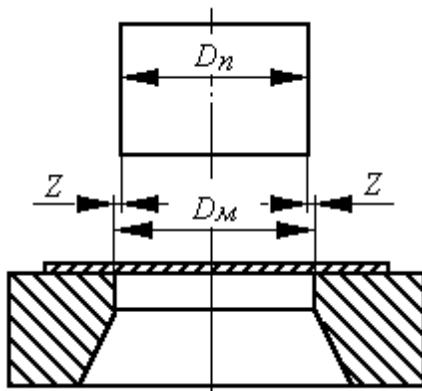


Рис. 7.2. Расчетная схема вырубного штампа

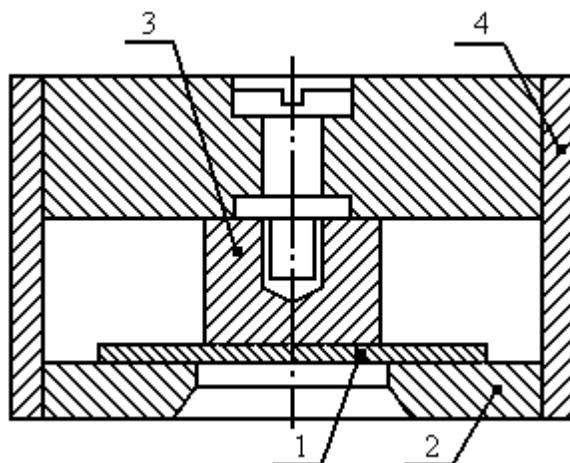


Рис. 7.3. Эскиз сборочного чертежа вырубного штампа: 1 – заготовка; 2 – матрица; 4 – контейнер; 3 – пуансон

Необходимо определить размеры диаметров пуансона  $D_n$  и матрицы  $D_m$ . При вырубке наружного контура диаметр отверстия в матрице принимается равным диаметру заготовки, тогда

$$D_m = D_3.$$

Диаметр пуансона уменьшается на величину зазора

$$D_n = D_m - 2 \cdot Z,$$

где  $Z$  – односторонний зазор между матрицей и пуансоном, мм.

Величина зазора сильно влияет на качество поверхности среза, величину необходимого усилия, точность получаемой детали, износ и стойкость штампа. Оптимальная величина одностороннего зазора  $Z$  определяется по табл. 7.3.

Таблица 7.3

**Оптимальная величина одностороннего зазора  $Z$** 

Область применения	Толщина металла $S$ , мм	Величина зазора $Z$ в % от толщины металла
Вырубка и пробивка стали	0,2 0,03–3,0	0 (без зазора) 3–6
Вырубка и пробивка алюминия	До 3 3–10	2–4 4–6

**Определение усилий вырубки**

Расчетное усилие вырубки  $P_e$  определяется по формуле в ньютонах

$$P_e = \pi \cdot D_3 \cdot S \cdot \tau_{cp},$$

где  $\tau_{cp}$  – предел прочности металла на срез, МПа. Для низкоуглеродистой стали  $\tau_{cp} \approx 320$  МПа.

Действительное усилие вырубки  $P_o$  определяется в ньютонах в зависимости от показаний манометра гидравлического пресса, на котором производится вырубка

$$P_o = \frac{\pi \cdot D_{pl}^2}{4} \cdot 10 \cdot N = 2,5 \cdot \pi \cdot D_{pl}^2 \cdot N,$$

где  $D_{pl}$  – диаметр плунжера гидравлического пресса, см ( $D_{pl} = 8$  см);  $N$  – показание манометра гидравлического пресса в момент вырубки, атм (1 атм  $\approx 0,1$  МПа).

**Сравнение расчетного значения усилия вырубки с действительным (по показанию манометра)**

Погрешность расчетного значения усилия вырубки определяется сравнением с действительным значением усилия, полученным по показанию манометра. Относительная погрешность определяется в процентах по формуле

$$\eta = \frac{P_o - P_e}{P_o} \cdot 100\%$$

## **Выполнение расчетов и эксперимента по операции вытяжки при изготовлении детали**

### *Определение необходимого количества операций вытяжки*

При разработке технологического процесса вытяжки необходимо знать, возможно ли проведение вытяжки за одну операцию, или необходимы несколько последовательных операций этого процесса. От правильно-сти решения этого вопроса зависит качество получаемого изделия и экономичность процесса. При этом необходимо, чтобы во время вытяжки в металле не возникали напряжения, вызывающие разрушение металла, а пластичность металла использовалась полностью. При этом расчете определяется необходимая степень деформации, которая оценивается коэффициентом вытяжки  $K$ . Этот коэффициент представляет собой отношение внутреннего диаметра, полученного при вытяжке изделия к диаметру заготовки

$$K = d/D_3.$$

Расчетное значение коэффициента вытяжки  $K$  сравнивается с предельным его значением  $K_{np}$  (табл. 7.4).

Таблица 7.4.

**Предельные значения коэффициента вытяжки  $K_{np}$**

Материал	$K_{np}$
Сталь 08 холоднокатаная для глубокой вытяжки	0,52...0,54
Латунь марки Л68 и медь	0,50...0,52
Дюралюминий Д16М	0,56...0,58

### *Определение номинальных размеров рабочих частей вытяжного штампа*

Расчетная схема и эскиз сборочного чертежа вытяжного штампа показаны на рис. 7.4 и 7.5.

При заданном по чертежу готового изделия внутреннем диаметре  $d$  (см. рис. 7.1) диаметр пуансона  $d_n$  принимают равным величине  $d$ , т. е.

$$d_n = d.$$

Тогда диаметр матрицы  $d_m$  должен быть больше диаметра пуансона на удвоенную величину одностороннего зазора между матрицей и пуансоном

$$d_m = d_n + 2 \cdot m,$$

где  $m$  – величина одностороннего зазора между матрицей и пуансоном. При вытяжке без уменьшения толщины стенки величина  $m$  определяется по формуле

$$m = S + c \cdot S,$$

где  $c$  – коэффициент верхнего значения допусков на толщину материалов, равный 0,3.

Радиус закругления кромок пуансона  $R_n$  принимается равным внутреннему радиусу закругления изделия, получаемого при вытяжке, но не менее  $(2\text{--}3) \cdot S$ .

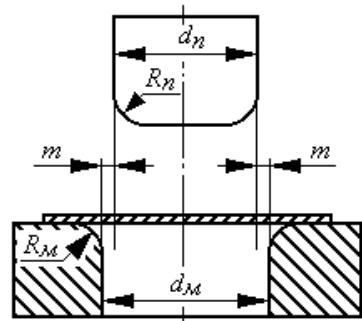


Рис. 7.4. Расчетная схема вытяжного штампа

Таблица 7.5

**Радиус закруглений вытяжной матрицы  $R_m$**

Наименование характеристики	Относительная толщина заготовки $(S/D_3) \cdot 100\%$		
	2,0–1,0	1,0–0,3	0,3–0,1
$R_m$	$(6\text{--}8)} \cdot S$	$(8\text{--}10)} \cdot S$	$(10\text{--}15)} \cdot S$

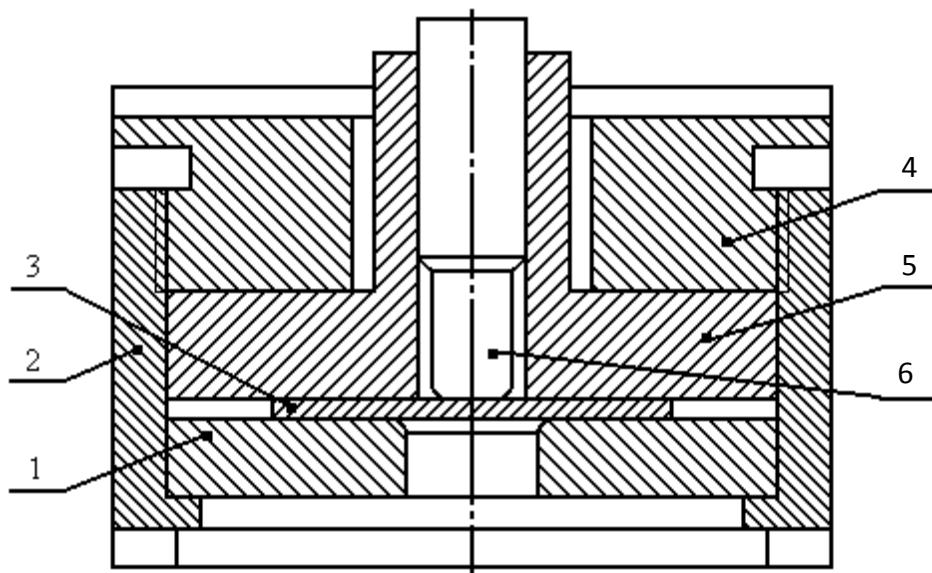


Рис. 7.5. Эскиз сборочного чертежа лабораторного вытяжного штампа:  
1 – матрица; 2 – контейнер; 3 – заготовка; 4 – прижимная гайка;  
5 – прижим; 6 – пуансон

Радиус закругления кромок вытяжной матрицы  $R_m$  определяют в зависимости от относительной толщины заготовки из табл. 7.5.

*Определение усилий вытяжки*

Расчетное усилие вытяжки зависит от механических свойств деформируемого металла и его толщины, размеров изделия, коэффициента вы-

тяжки и коэффициента трения между заготовкой и материалом штампа. Для практических расчетов при определении усилия вытяжки пользуются эмпирической формулой

$$P_e = \pi \cdot d_n \cdot S \cdot \sigma_e \cdot k,$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий дополнительное усилие, необходимое для проталкивания деформируемой заготовки через матрицу ( $k = 1,25$ );  $\sigma_e$  – предел прочности деформируемого металла на растяжение, МПа. Для низкоуглеродистой стали  $\sigma_e \approx 400$  МПа.

Для предотвращения образования складок на цилиндрических стенках изделия в вытяжном штампе применяют прижимное кольцо, или складкодержатель (см. рис. 7. 4), прижимающий часть заготовки к матрице штампа с усилием  $Q$ , величина которого должна быть достаточной, чтобы фланец заготовки не имел возможности образовывать складок.

Полное расчетное усилие вытяжки  $P_n$  будет равно сумме

$$P_n = P_e + Q,$$

где усилие прижима  $Q$  рассчитывается по формуле

$$Q = F \cdot q,$$

где  $F$  – площадь заготовки, находящейся под прижимом в начальный момент вытяжки;  $q$  – удельное усилие воздействия прижима на деформируемую заготовку.

Площадь заготовки  $F$ , находящейся под прижимом, определяется по формуле

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot [D_3^2 - (d_m + 2 \cdot R_m)^2]$$

Удельное усилие прижима  $q$  в зависимости от деформируемого металла принимается по данным табл. 7.6.

Таблица 7.6

#### Удельное усилие прижима $q$ , Мпа

Материал	$q$
Сталь мягкая для глубокой вытяжки:	
при $S > 0,5$ мм	2,5–3,0
при $S < 0,5$ мм	2,0–2,5
Медь	1,2–1,5
Латунь	1,5–2,0
Дюралюминий Д16АТ	1,4–1,8

Операция вытяжки детали проводится на лабораторном гидравлическом прессе. Действительное усилие вытяжки  $P_d$  определяется в ньютонах по формуле

$$P_d = \frac{\pi \cdot D_{пл}^2}{4} \cdot 10 \cdot N = 2,5 \cdot \pi \cdot D_{пл}^2 \cdot N,$$

где  $D_{nl}$  – диаметр плунжера гидравлического пресса, см ( $D_{nl} = 8$  см);  
 $N$  – показание манометра гидравлического пресса в момент вытяжки, атм.

Сравнение полного расчетного  $P_n$  и действительного  $P_d$  значений усилия вытяжки проводится по формуле относительной погрешности, аналогичной погрешности определения усилия вырубки.

## Содержание отчета по лабораторной работе

В отчете должны быть представлены:

- эскизы всех приведенных в методических указаниях разделительных и формоизменяющих операций листовой штамповки (см. табл. 7.1) и точные формулировки этих операций;
- эскиз готового изделия (см. рис. 7.1);
- расчет диаметра плоской заготовки  $D_3$ ;
- схема (см. рис. 7.2) и расчет основных размеров пуансона и матрицы вырубного штампа;
- расчет силовых условий процесса вырубки (расчетного и фактического усилий вырубки, их сравнение);
- схема (см. рис. 7.4) и расчет основных размеров пуансона и матрицы вытяжного штампа;
- расчет силовых условий процесса вытяжки (полного расчетного и фактического усилий вытяжки, их сравнение).

## Контрольные вопросы

1. Что относят к разделительным операциям листовой штамповки?
2. Что относят к формоизменяющим операциям листовой штамповки?
3. Что происходит с материалом в процессе холодной пластической деформации?
4. Как можно снять наклеп после холодной пластической деформации?
5. При какой температуре можно проводить горячую пластическую деформацию?
6. Как можно повысить пластичность материала перед обработкой его давлением?
7. Как называется операция листовой штамповки, при которой плоская заготовка превращается в полое тело?
8. За счет чего происходит упрочнение металла в процессе пластической деформации?
9. Что такое прочность материала?
10. Как называется операция отделения заготовки по замкнутому контуру, при котором отделяемая часть является деталью?

## *Лабораторная работа № 8*

# **ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ**

### **Выбор методов и способов производства заготовок объемной штамповкой**

Получение деталей машин может быть осуществлено как непосредственно из проката (без предварительного формообразования заготовки), так и с предварительным формированием заготовок методами литья или обработки давлением [5].

Основными факторами, влияющими на выбор способа получения заготовки, являются следующие: тип производства; технологические свойства материала; требования к механическим и эксплуатационным свойствам детали; размеры, масса и конфигурация детали; качество поверхности, обеспечение заданной точности; возможности имеющегося оборудования и т.д.

*Для единичного и мелкосерийного производства* характерно использование в качестве исходной заготовки горячекатаного сортового проката, а также отливок или поковок, получаемых способами, не требующими изготовления сложной технологической оснастки (например, литье в песчано-глинистые формы, свободная ковка и т.д.) [5].

*В условиях крупносерийного и массового производства* (крупные предприятия по производству автотракторной техники, например, КамАЗ, ВАЗ, Челябинский тракторный завод и др.) используются методы предварительного формообразования заготовки, делающие ее максимально приближенной к форме и размерам готовой детали. Это позволяет резко сократить объем трудоемких и малопроизводительных операций; если при изготовлении деталей из проката отходы металла в стружку составляют от 30 до 50%, то при использовании методов обработки давлением и литья, в особенности способов, при которых фасонные заготовки получаются повышенной точности (штамповка на паровоздушных горячештамповочных молотах (ПГШМ), на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП), горизонтально-ковочных машинах (ГКМ), штамповка с калибровкой, штамповка выдавливанием, изотермическая штамповка), отходы металла в стружку составляют (7–20)%.

С учетом требований к механическим и эксплуатационным свойствам ответственных, тяжело нагруженных деталей, работающих в условиях переменных нагрузок (шестерни, зубчатые колеса, роторы, компрессорные диски, коленчатые валы, торсионы, рессоры и т.п.) при изготовлении заготовок целесообразно использовать способы, связанные с горячей пластической деформацией металла, поскольку при этом создается качественная структура металла (мелкозернистость, благоприятное расположение волокон), залечиваются внутренние дефекты литого металла (при использовании слитка), значительно повышаются его механические свойства [5].

Недостатком горячей объемной штамповки является только ограниченная масса получаемых поковок – до 400 кг в зависимости от сложности. Формоизменение металла производится в открытых (рис. 8.1, *a* – *d*) и закрытых (рис. 8.1, *e* – *k*) штампах; в первом случае излишки металла заготовки выталкиваются в облой (отход, который появляется из-за неточности объема заготовки или вводится для создания подпора); во втором – поковка штампуется без облоя из точной по объему заготовки.

Горячей объемной штамповкой получают качественные поковки массой до 400 кг для ответственных деталей автомобилей (рис. 8.2), тракторов (рис. 8.3), сельскохозяйственных машин, оборонной техники, железнодорожного транспорта и т.д. В большинстве машин они составляют до 20% общей массы деталей (зубчатые колеса, коленчатые валы, оси, траки, шатуны, распределительные валы, балансиры, рычаги, полуоси, поршни, клапаны и т.д.).

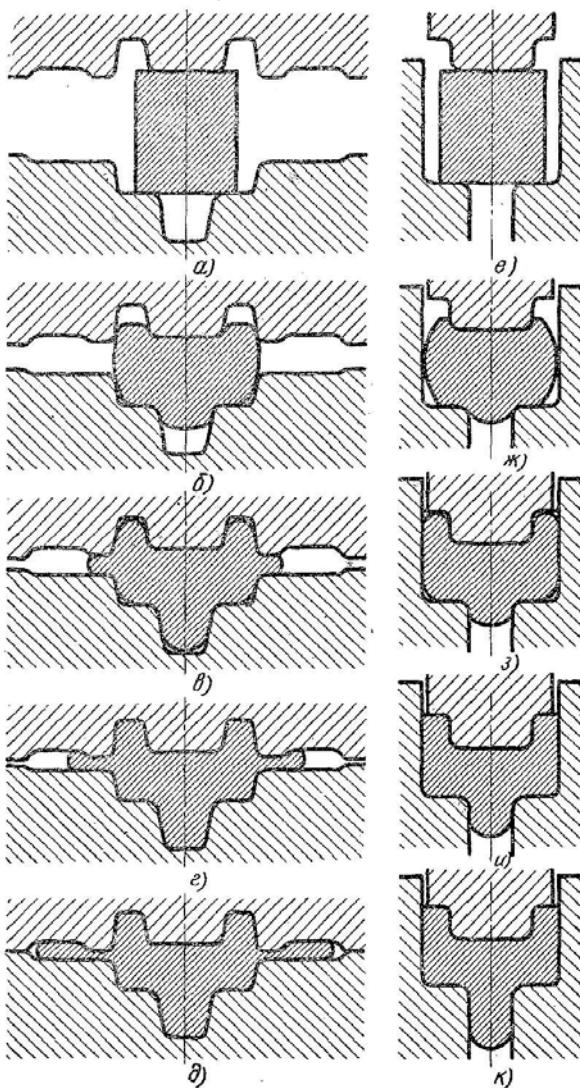


Рис. 8.1. Формоизменение заготовок в открытом и закрытом штампах

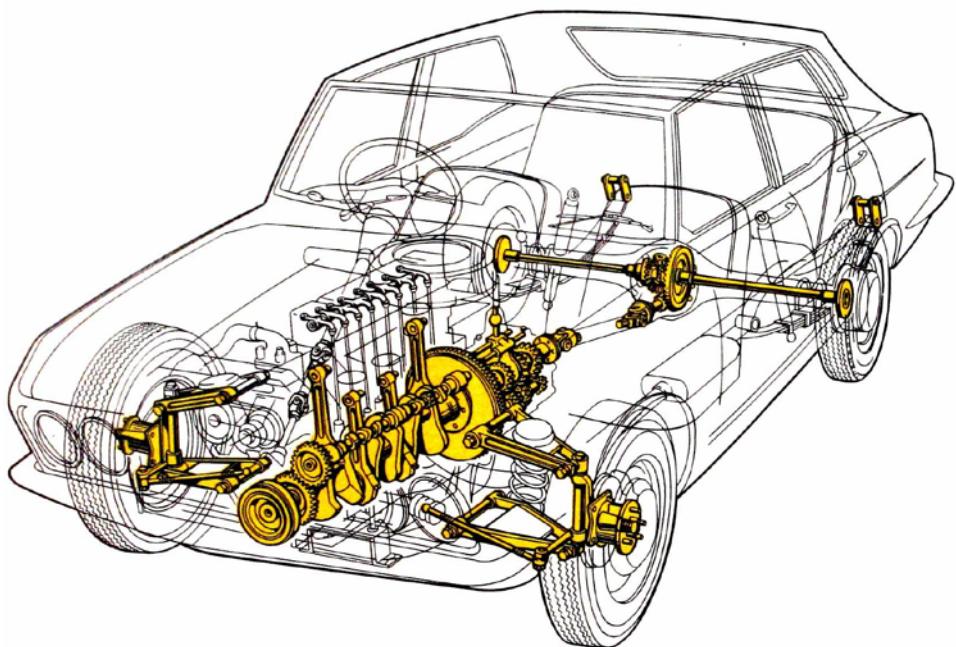


Рис. 8.2. Детали легкового автомобиля, изготовленные горячей штамповкой (выделены)

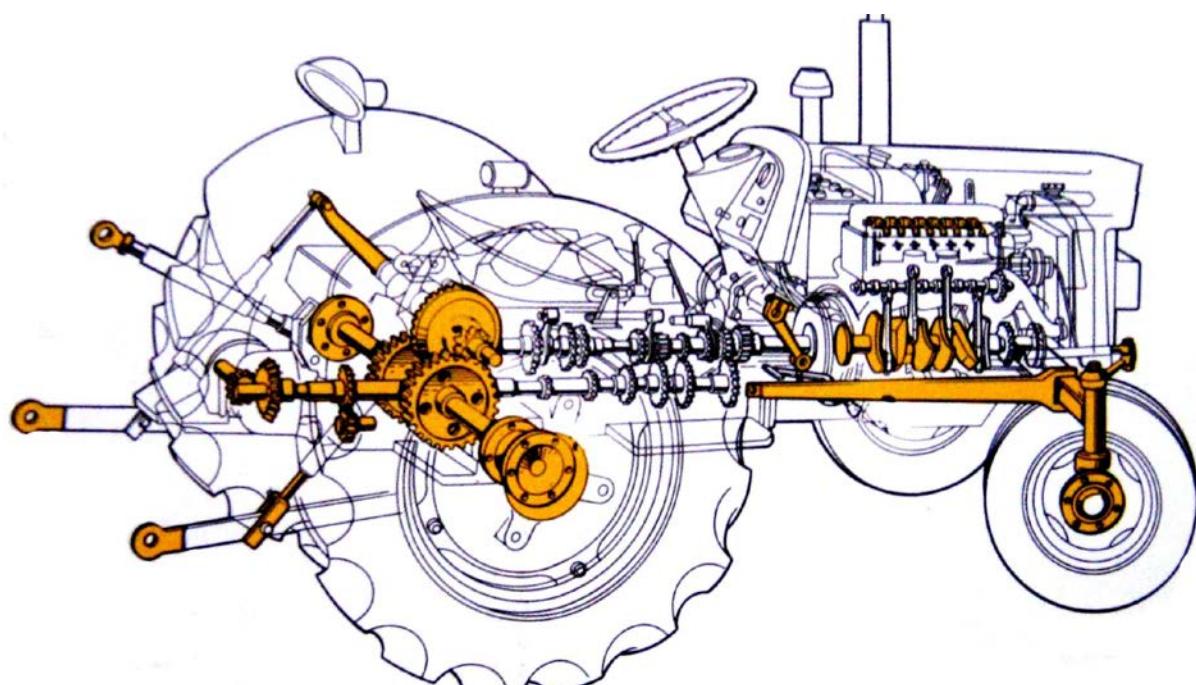


Рис. 8.3. Детали трактора, изготовленные горячей штамповкой (выделены)

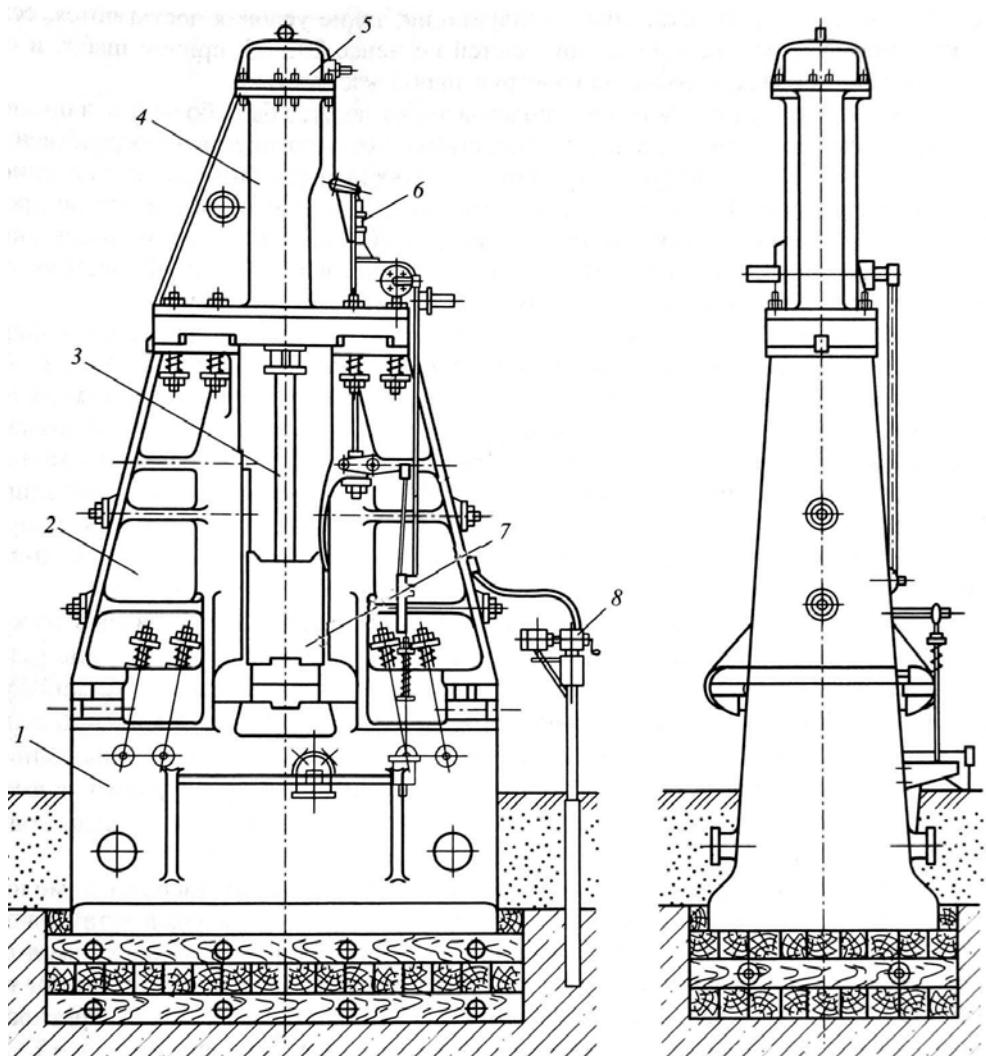
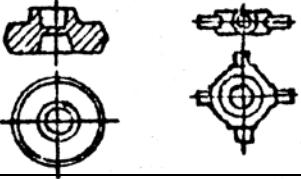
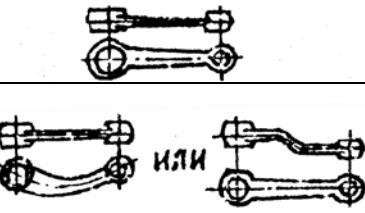
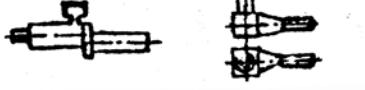


Рис. 8.4. Конструкция современного паровоздушного штамповочного молота:  
1 – шабот; 2 – стойка; 3 – шток; 4 – цилиндр; 5 – крышка цилиндра с буфером;  
6 – золотник; 7 – баба; 8 – кран

Поковки штампуются на ПГШМ и КГШП. Молоты (рис. 8.4) являются универсальным оборудованием со свободным ходом рабочих частей, а поэтому весьма распространенным при изготовлении заготовок сложной конфигурации (табл. 8.1). При этом надо иметь в виду, что верхняя часть молотового штампа заполняется металлом лучше, поэтому в нем располагают наиболее глубокую полость, а также трудно заполняемые элементы поковки.

Таблица 8.1

## Поковки, штампаемые на ПГШМ и КГШП

Форма штамповок (поковок)	Конфигурация
Круглые и квадратные в плане и близкие к ним	
С вытянутой осью	Прямой
	Изогнутой
Типа развилин	
С отростками	
Смешанной конфигурации	

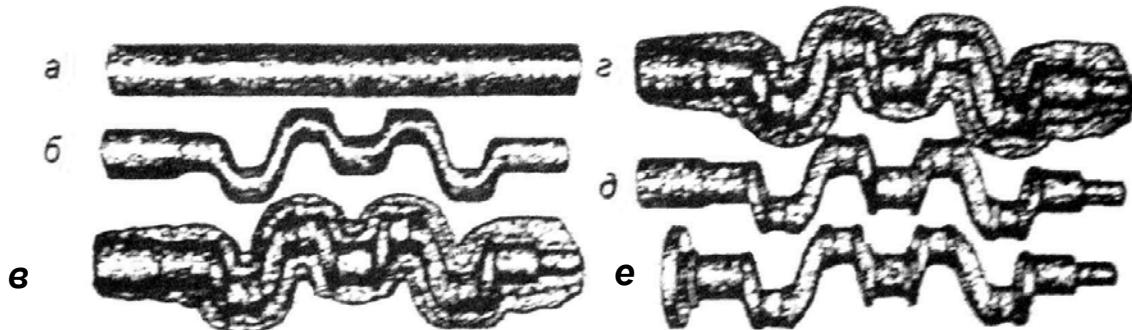


Рис. 8.5. Переходы штамповки коленчатого вала: *а* – исходная заготовка; *б* – гибка; *в* – штамповка в черновом ручье; *г* – штамповка в чистовом ручье; *д* – обрезка облоя; *е* – высадка фланца

При штамповке поковок с вытянутой осью и переменными сечениями по длине на рабочих поверхностях штампов располагаются не только штамповочные ручьи (предварительные и чистовые), но и заготовительные (протяжные, подкатные, гибочные и др.). На рис. 8.6 показан молотовый штамп для штамповки детали «рычаг тормозного крана». Формовка полуфабрикатов в заготовительных ручьях приближает форму заготовки к окончательной форме поковки (рис. 8.5, 8.6), а это уменьшает износ чистовых ручьев.

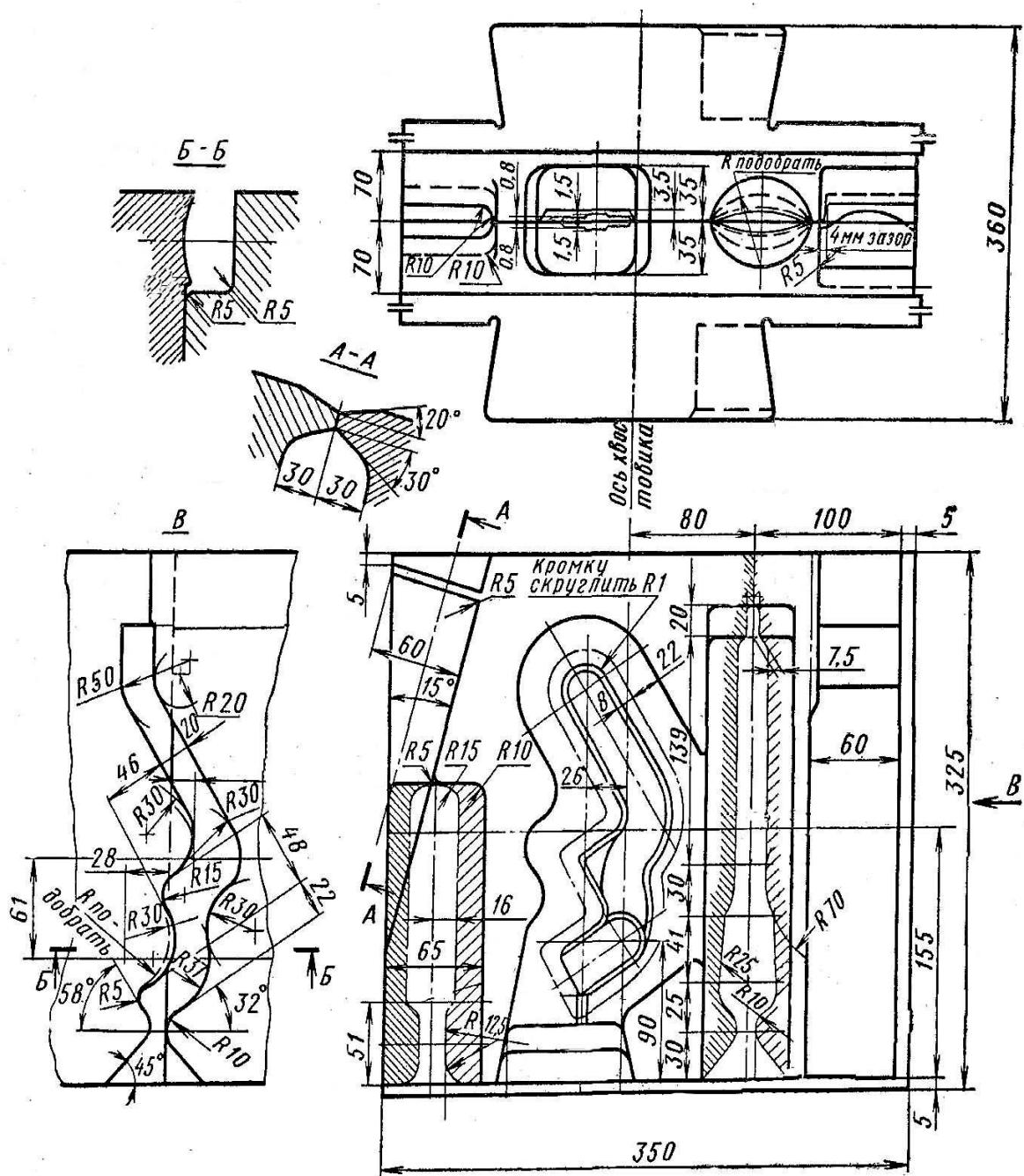


Рис. 8.6. Штамп молотовый для штамповки детали «рычаг тормозного крана»

На рабочих поверхностях верхнего и нижнего штампов нарезаются ручьи. В данном случае: гибочный (вид В), протяжной, отрубной, подкатной, чистовой.

Поковки (см. табл. 8.1), штампаемые на КГШП (рис. 8.7), имеют более высокую точность размеров, что приводит к экономии металла и снижению трудоемкости механической обработки.

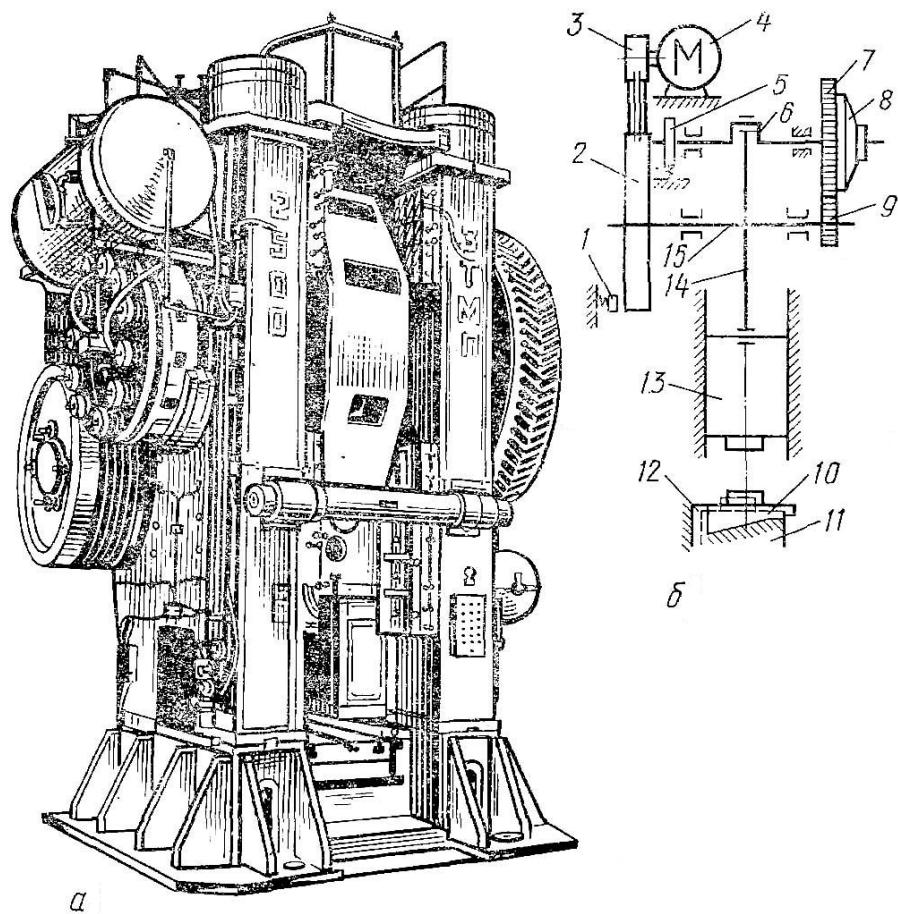


Рис. 8.7. Кривошипный горячештамповочный пресс: *а* – общий вид; *б* – кинематическая схема: 1 – тормоз; 2 – маховик; 3 – шкив; 4 – электродвигатель; 5 – кулачок; 6 – кривошипный вал; 7, 9 – шестерни; 8 – муфта фрикционная; 10 – подушка клиновая; 11 – стол; 12 – станина; 13 – ползун

Штамп молотовый (см. рис. 8.6) состоит из двух половин, каждая из которых имеет «ласточкин хвост» для закрепления в бабе и соублоке (штамподержателе). Высота хвостовиков всегда больше глубины полостей, в которую вставляются штампы, с тем, чтобы нагрузки не передавались «плечам». А ширина хвостовиков должна быть такой, чтобы они проходили в полости. В образовавшийся зазор забивается клин. Смещение штампов в перпендикулярном направлении ограничивается Т-образными шпонками (сухарями), которые вставляются в полости хвостовиков (на рис. 8.6 выделены штриховыми линиями слева вверху и внизу), бабы и соублока.

При штамповке на КГШП лучше заполняется нижняя часть штампа, поэтому там должны располагаться наиболее глубокие ручьи и трудно заполняемые элементы поковки. Наличие выталкивателей поковок в штампах позволяет значительно уменьшить штамповочные уклоны (в 2–3 раза по сравнению со штамповкой на молотах), а также получать поковки в закрытых штампах выдавливанием (рис. 8.8).

Поковки, получаемые на ГКМ (рис. 8.9), обычно имеют форму тел вращения (табл. 8.2, группы 1 – 5). Реже – сложнофасонные (см. табл. 8.2, группа 6).

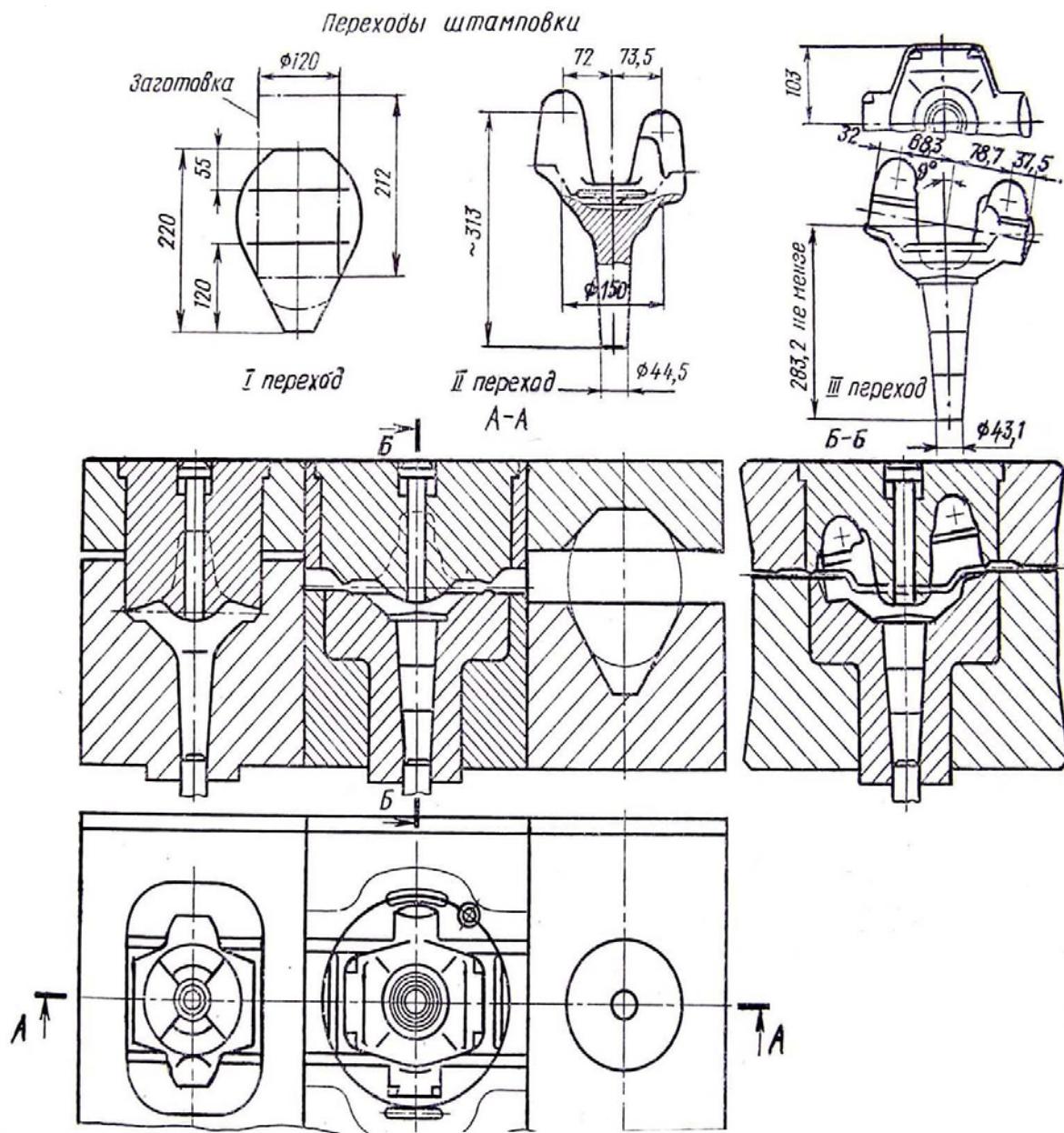


Рис. 8.8. Штамповые инструменты и переходы штамповки поковки детали «поворотный кулак» автомобиля: I – осадка цилиндрической заготовки; II – предварительная штамповка выдавливанием; III – штамповка в чистовом ручье и соответствующие инструменты (в, а, б) штампа КГШП

Таблица 8.2

## Поковки, штампаемые на ГКМ

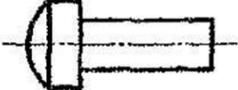
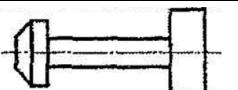
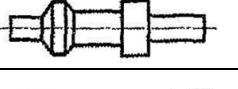
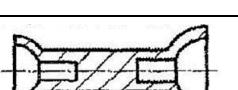
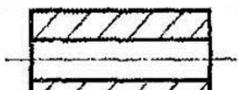
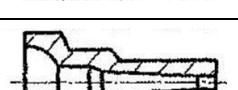
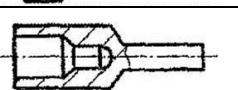
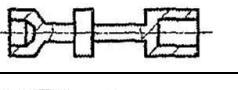
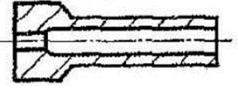
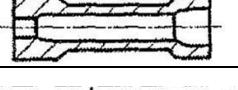
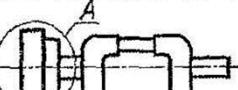
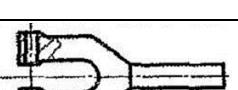
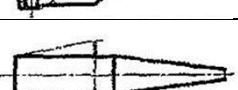
Группы	Подгруппы	Характеристика подгруппы	Примерная конфигурация
1 Типа стержня с утолщением	1	С утолщением на одном конце	
	2	С утолщением на обоих концах стержня	
	3	С одним и более утолщением по длине стержня	
2 С глухой полостью	1	С одного конца	
	2	С двусторонней полостью	
3 Со сквозной полостью	1	Гладкие	
	2	Со сложным контуром	
4 Со смешанной конфигурацией	1	С глухой полостью переменного сечения по длине	
	2	С глухой или сквозной полостью с буртами (утолщениями) по длине	
5 Из трубчатой заготовки	1	С односторонним наружным (внутренним) буртами	
	2	С двусторонним наружным (внутренним) буртами	
6 Комбинированной формы	1	Подсадки на ГКМ местных утолщений А	
	2	С прошивкой или пробивкой местных полостей	
	3	Выполнение других операций в отдельных местах (подсадка уклона и др.)	

Рис. 8.9. Кинематическая схема горизонтально-ковочной машины (вид в плане):  
 1 – боковой ползун с зажимным инструментом;  
 2 – зажимная матрица неподвижная;  
 3 – заготовка прутковая; 4 – пуансон;  
 5 – ползун центральный с пуансонами;  
 6 – рычаг бокового ползуна;  
 7 – кривошипно-шатунный механизм

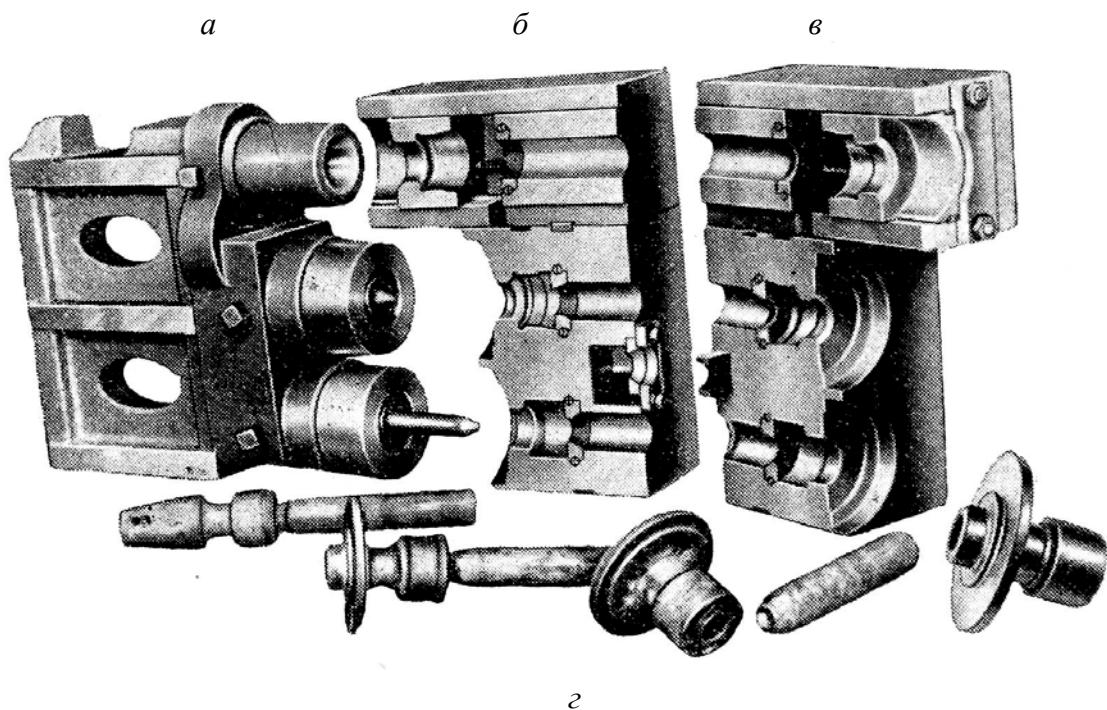
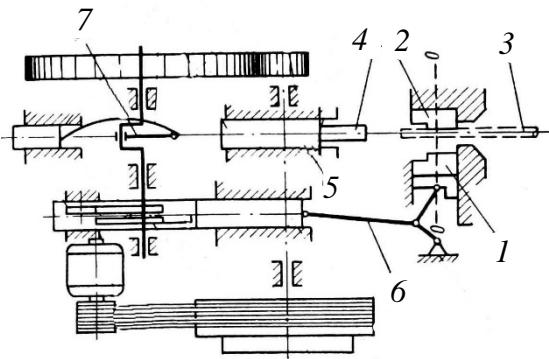


Рис. 8.10. Пуансонный блок (а), разъемные матрицы (б, в) и полуфабрикаты детали «шестерня заднего хода трактора»

Инструмент ГКМ (рис. 8.10) состоит из трех частей: разъемных матриц (зажимающих и удерживающих исходную заготовку, рис. 8.10, б и в) и высадочного пуансона (рис. 8.10, а). Наличие двух плоскостей разъема штампов ГКМ позволяет:

- уменьшить до минимума или вообще исключить штамповочные уклоны;
- в большинстве случаев производить штамповку без облоя, что приводит к уменьшению отходов.

Особенность конструирования штампов ГКМ такова, что полости матриц для операций, требующих для деформирования металла приложения наибольших сил, располагаются ближе к центру блока (рис. 8.11, IV – высадка окончательная фланца).

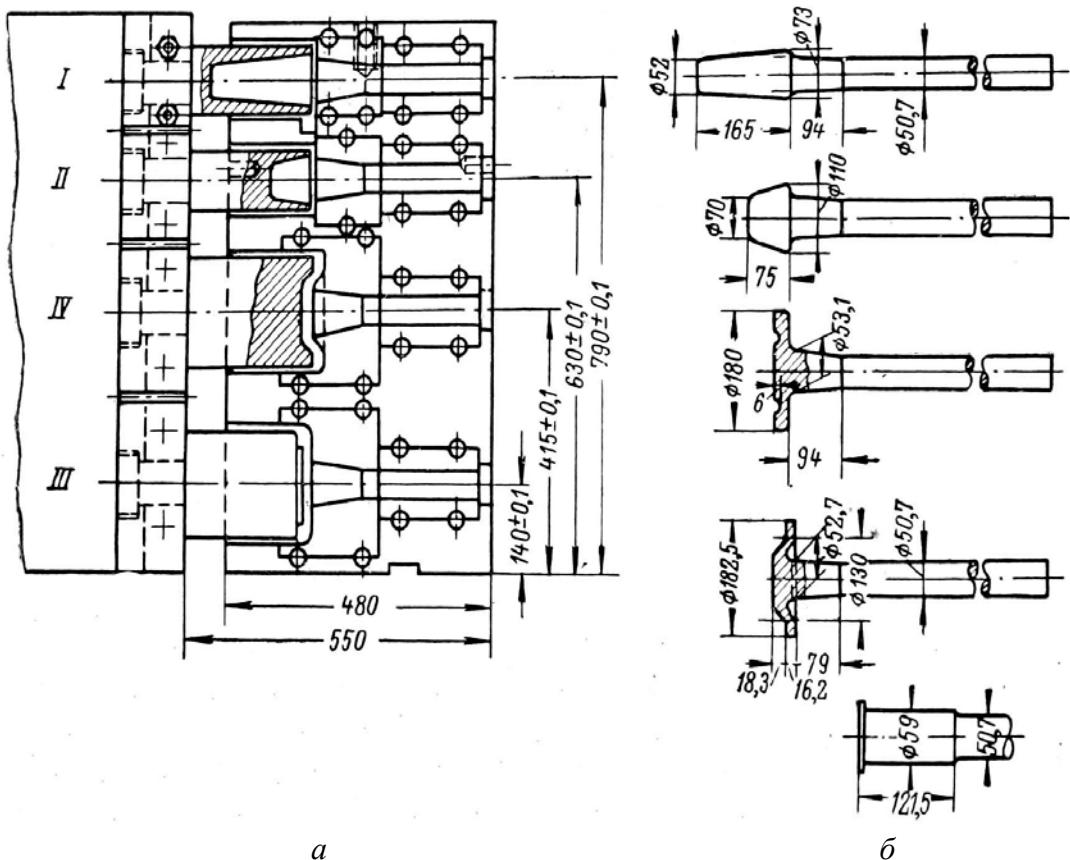


Рис. 8.11. Инструмент (а) и переходы штамповки (б) детали «полуось» автомобиля:  
 I, II – набор металла под утолщение; III – черновая штамповка фланца;  
 IV – окончательная высадка фланца

### Разработка технологии открытой горячей объемной штамповки

Базовой для разработки технологий является информация о характеристике материала детали, требованиях к расположению волокон макроструктуры, размерной точности, о форме детали (по рабочему чертежу, рис. 8.12), о шероховатости поверхностей.

Чертеж поковки разрабатывается по чертежу готовой детали в соответствии с ГОСТ 7505–89.

*Алгоритм разработки чертежа поковки* (заготовки под механическую обработку) следующий:

- определить  *положение поковки в верхней и нижней половинах штампа* с учетом свободного ее извлечения и особенностей заполнения полостей при штамповке на ПГШМ или КГШП;
- определить *класс точности поковки* в зависимости от вида технологического оборудования и прогнозируемой точности размеров поковки;
- выбрать *плоскость разъема штампа* (не всегда плоскую);
- определить *группу стали*, используемой для изготовления поковки;
- определить *массу детали*;

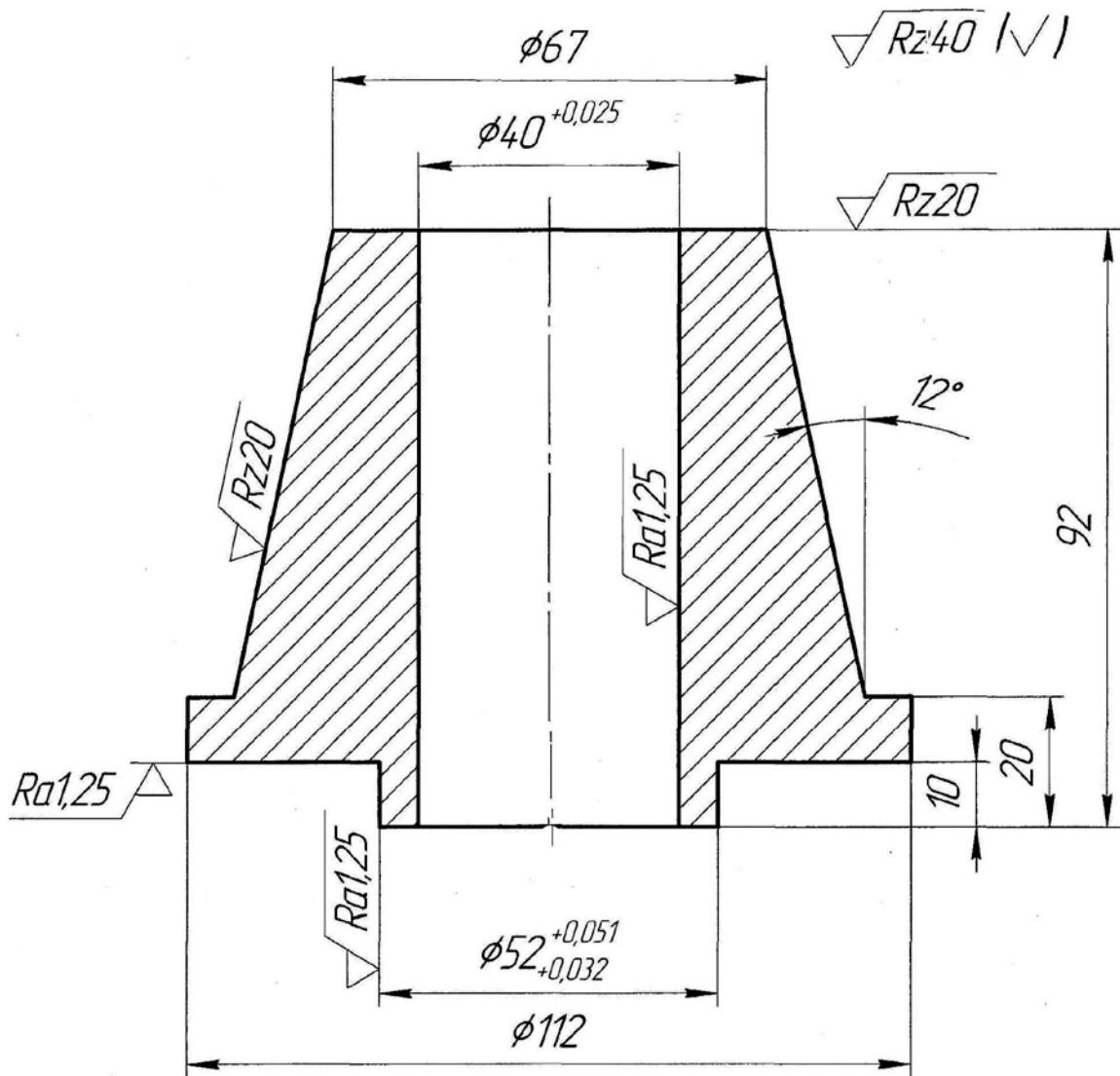


Рис. 8.12. Рабочий чертеж детали «втулка»

- определить *степень сложности поковки*;
- определить *исходный индекс*;
- выбор *припусков* на механическую обработку;
- выбор *допусков* на размеры холодной поковки;
- определить зоны, в которых необходимо сделать *напуски* (за счет штамповочных уклонов и радиусов скруглений, «заполнения» поперечных канавок, впадин зубьев и шлицев, шпоночных пазов, перемычек отверстий и др.);
- формирование *чертежа холодной поковки*;
- формирование *чертежа горячей поковки*, по размерам которой изготавливаются полости штампов;
- определить *форму и размеры исходной заготовки*.

## **Определение класса точности поковки**

Класс точности поковки устанавливается по табл. 8.3.

Таблица 8.3

### **Выбор класса точности поковок**

Технологическое оборудование, технологический процесс	Класс точности			
	T2	T3	T4	T5
КГШП; открытая (облойная) штамповка			+	+
КГШП; закрытая штамповка	+	+		
ГКМ; открытая (облойная) штамповка			+	+
ПГШМ; открытая (облойная) штамповка			+	+
Горячештамповочные автоматы	+	+		

## **Определение группы стали**

В соответствии с ГОСТ 7505– 89 деформируемые стали подразделяются на три группы в зависимости от среднего массового содержания углерода и легирующих элементов (Si, Mn, Cr, Ni, W, V, Ti, Al и т.д.):

*M1* – с массовой долей углерода до 0,35% и суммарной долей легирующих элементов до 2,0%;

*M2* – с массовой долей углерода от 0,35 до 0,65% и суммарной долей легирующих элементов от 2,0 до 5,0%;

*M3* – с массовой долей углерода свыше 0,65% и суммарной долей легирующих элементов более 5,0%.

Такое подразделение сталей учитывает их различное сопротивление деформированию и, соответственно, различный износ штампов.

## **Определение степени сложности поковки**

*Степень сложности* получаемой поковки является одной из характеристик, определяющих величину назначаемых припусков и допусков. Степень сложности  $C_i$  определяется путем вычисления отношения массы  $M_n$  (объема  $V_n$ ) поковки к массе  $M_\phi$  (объему  $V_\phi$ ) геометрической фигуры, в которую вписывается форма поковки:  $C_i = M_n / M_\phi = V_n / V_\phi$ .

Установлены *четыре степени сложности* поковок: *C1* – свыше 0,63; *C2* – от 0,32 до 0,63; *C3* – от 0,16 до 0,32; *C4* – до 0,16.

## **Определение исходного индекса**

*Исходный индекс (ИИ)* – комплексный показатель, характеризующий поковку в целом, от величины которого зависят припуски и допуски на размеры поковки (ГОСТ 7505– 89).

Таблица 8.4

**Значение расчетного коэффициента  $K_p$** 

Группа	Характеристика детали	Типовые представители	$K_p$
1. 1.1. 1.2.	Удлиненной формы: с прямой осью; с изогнутой осью	Валы, оси, цапфы, шатуны рычаги, сошки рулевого управления	1,3-1,6 1,1-1,4
2 2 1 2 2 2 3	Круглые и многогранные в плане: круглые; квадратные, прямоугольные, мно- гогранные; с отростками	Шестерни, фланцы  Фланцы, ступицы, гайки крестовины, вилки	1,5-1,8 1,3-1,7 1,4-1,6
3	Комбинированной конфигурации (сочетание элементов 1-й и 2-й групп)	Кулаки поворотные, колен- чатые валы	1,3-1,8
4	С большим объемом необрабаты- ваемых поверхностей	Балки передних осей, рычаги переключения коробок пере- дач, буксируемые крюки	1,1-1,3
5	С отверстиями, углублениями, поднурениями (не оформляемы- ми в поковке при штамповке)	Полые валы, фланцы, блоки шестерен	1,8-2,2

Таблица 8.5

**Определение исходного индекса**

Масса поковки, кг	Группа стали			Степень сложно- сти поковки				Класс точности поковки					Исх. ин- декс
	M1	M2	M3	C1	C2	C3	C4	T1	T2	T3	T4	T5	
До 0,5 включ.													1
Св. 0,5 до 1,0													2
Св. 1,0 до 1,8													3
Св. 1,8 до 3,2													4
Св. 3,2 до 5,6													5
Св. 5,6 до 10,0													6
Св. 10 до 20													7
Св. 20 до 50													8
Св. 50 до 125													9
Св. 125 до 250													10
													11
													12
													13
													14
													15
													16
													17
													18
													19
													20
													21
													22
													23

Таблица 8.6

## Примеры определения исходного индекса

Масса поковки, кг	Группа стали			Степень сложности поковки				Класс точности поковки					Исх. индекс
	M1	M2	M3	C1	C2	C3	C4	T1	T2	T3	T4	T5	
До 0,5 включ.	x												1
Св. 0,5 до 1,0													2
Св. 1,0 до 1,8	x												3
Св. 1,8 до 3,2													4
Св. 3,2 до 5,6													5
Св. 5,6 до 10,0													6
													7

Исходный индекс выбирается по табл. 8.5, следуя примеру, который приведен в табл. 8.6. Для определения исходного индекса находим в графике «Масса поковки» (*масса поковки расчетная*) соответствующую данной массе строку и перемещаемся вправо по горизонтали или по утолщенным наклонным линиям вправо – вниз до пересечения с вертикальными линиями, соответствующими заданным величинам  $M$ ,  $C$  и  $T$ , а затем до колонки «Исходный индекс».

Но сначала вычисляется *масса поковки расчетная* (предварительная)

$$M_{np} = M_d \cdot K_p,$$

где  $K_p$  – расчетный коэффициент по ГОСТ 7505–89 (табл. 8.4). Это масса металла, который подвергается пластической деформации (в эту массу не входит масса облоя);  $M_d$  – масса готовой детали, кг.

## Выбор припусков на механическую обработку

*Припуски – предусмотренные (односторонние) увеличения размеров поковки по сравнению с номинальными размерами детали, обеспечивающие после обработки поковки на металлорежущих станках требуемые размеры и шероховатость поверхностей детали.*

Таблица 8.7

## Дополнительный припуск на сторону, мм

Наибольший размер поковки, мм	Класс точности				
	T1	T2	T3	T4	T5
До 100 включительно	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4
Св. 100 до 160	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
Св. 160 до 250	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Св. 250 до 400	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8
Св. 400 до 630	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0

*Общий припуск включает основной (табл. 8.7) и дополнительный припуски (табл. 8.8). Последние учитывают отклонения формы поковки за счет сдвига верхней и нижней половин штампов, искривления поковки, двойной термической обработки и др.*

Таблица 8.8

**Основные припуски на механическую обработку (на сторону)**

Исх. индекс	Длина, ширина, диаметр, глубина и высота детали, мм																	
	до 40		40–100		100–160		160–250		250–400		400–630		Шероховатость поверхности детали Rz (Ra), мкм (Rz выше, Ra ниже в скобках)					
	100 (125) √	10 (1,6) √	100 (125) √	10 (1,6) √	100 (125) √	10 (1,6) √	100 (125) √	10 (1,6) √	100 (125) √	10 (1,6) √	100 (125) √	10 (1,6) √	100 (125) √	10 (1,6) √	100 (125) √	10 (1,6) √	100 (125) √	10 (1,6) √
1	0,4	0,6	0,7	0,4	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,6	0,8	0,9	0,6	0,8	0,9	—	—	—
2	0,4	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,6	0,8	0,9	0,6	0,8	0,9	0,7	0,9	1,0	0,8	1,0	1,1
3	0,5	0,6	0,7	0,6	0,8	0,9	0,6	0,8	0,9	0,7	0,9	1,0	0,8	1,0	1,1	0,9	1,1	1,2
4	0,6	0,8	0,9	0,6	0,8	0,9	0,7	0,9	1,0	0,8	1,0	1,1	0,9	1,1	1,2	1,0	1,3	1,4
5	0,6	0,8	0,9	0,7	0,9	1,0	0,8	1,0	1,1	0,9	1,1	1,2	1,0	1,3	1,4	1,1	1,4	1,5
6	0,7	0,9	1,0	0,8	1,0	1,1	0,9	1,1	1,2	1,0	1,3	1,4	1,1	1,4	1,5	1,2	1,5	1,6
7	0,8	1,0	1,1	0,9	1,1	1,2	1,0	1,3	1,4	1,1	1,4	1,5	1,2	1,5	1,6	1,3	1,6	1,8
8	0,9	1,1	1,2	1,0	1,3	1,4	1,1	1,4	1,5	1,2	1,5	1,6	1,3	1,6	1,8	1,4	1,7	1,9
9	1,0	1,3	1,4	1,1	1,4	1,5	1,2	1,5	1,6	1,3	1,6	1,8	1,4	1,7	1,9	1,5	1,8	2,0
10	1,1	1,4	1,5	1,2	1,5	1,6	1,3	1,6	1,8	1,4	1,7	1,9	1,5	1,8	2,0	1,7	2,0	2,2
11	1,2	1,5	1,6	1,3	1,6	1,8	1,4	1,7	1,9	1,5	1,8	2,0	1,7	2,0	2,0	1,9	2,3	2,5
12	1,3	1,6	1,8	1,4	1,7	1,9	1,5	1,8	2,0	1,7	2,0	2,2	1,9	2,3	2,5	2,0	2,5	2,7
13	1,4	1,7	1,9	1,5	1,8	2,0	1,7	2,0	2,2	1,9	2,3	2,5	2,0	2,5	2,7	2,2	2,7	3,0
14	1,5	1,8	2,0	1,7	2,0	2,2	1,9	2,3	2,5	2,0	2,5	2,7	2,2	2,7	3,0	2,4	3,0	3,3
15	1,7	2,0	2,2	1,9	2,3	2,5	2,0	2,5	2,7	2,2	2,7	3,0	2,4	3,0	3,3	2,6	3,2	3,5

Припуски ( $Z_1$  и  $Z_2$ ), назначаемые на параллельные поверхности, имеющие различную шероховатость, естественно, будут отличаться. Они определяются для одних линейных размеров, но по разным столбцам табл. 8.7 и 8.8. Тогда линейные размеры детали (длина  $L$ , высота  $H$ ) будут равны  $L_n(H_n) = L_o(H_o) + Z_1 + Z_2$ .

## Определение допусков на размеры поковки

*Допуски* на размеры поковки, а также верхние и нижние отклонения от номинальных размеров назначаются по табл. 8.9 в зависимости от исходного индекса, размеров поковки и характера взаимодействия полостей штампа и поковки, недоштамповки по высоте, износа полостей штампа и смещения его частей (они являются определяющими). Поэтому увеличение *наружных размеров элементов поковки* из-за износа штампа компенсируется тем, что верхнее отклонение принимается максимальным, а уменьшение *внутренних размеров элементов (полостей)* компенсируется принятием верхнего отклонения минимальным.

Таблица 8.9

### Допуски и допускаемые отклонения линейных размеров поковок

Исходный индекс	Длина, ширина, диаметр, глубина и высота поковок, мм					
	До 40	От 40 до 100	От 100 до 160	От 160 до 250	От 250 до 400	
9	1,2 +0,8 -0,4	1,4 +0,9 -0,5	1,6 +1,1 -0,5	+1,1 -0,5	2,0 +1,3 -0,7	2,2 +1,4 -0,8
10	1,4 +0,9 -0,5	1,6 +1,1 -0,5	2,0 +1,3 -0,7	+1,3 -0,7	2,2 +1,4 -0,8	2,5 +1,6 -0,9
11	1,6 +1,1 -0,5	2,0 +1,3 -0,7	2,2 +1,4 -0,8	+1,4 -0,8	2,5 +1,6 -0,9	2,8 +1,8 -1,0
12	2,0 +1,3 -0,7	2,2 +1,4 -0,8	2,5 +1,6 -0,9	+1,6 -0,9	2,8 +1,8 -1,0	3,2 +2,1 -1,1
13	2,2 +1,4 -0,8	2,5 +1,6 -0,9	2,8 +1,8 -1,0	+1,8 -1,0	3,2 +2,1 -1,1	3,6 +2,4 -1,2
14	2,5 +1,6 -0,9	2,8 +1,8 -1,0	3,2 +2,1 -1,1	+2,1 -1,1	3,6 +2,4 -1,2	4,0 +2,7 -1,3
15	2,8 +1,8 -1,0	3,2 +2,1 -1,1	3,6 +2,4 -1,2	+2,4 -1,2	4,0 +2,7 -1,3	4,5 +3,0 -1,5
16	3,2 +2,1 -1,1	3,6 +2,4 -1,2	4,0 +2,7 -1,3	+2,7 -1,3	4,5 +3,0 -1,5	5,0 +3,3 -1,7
17	3,6 +2,4 -1,2	4,0 +2,7 -1,3	4,5 +3,0 -1,5	+3,0 -1,5	5,0 +3,3 -1,7	5,6 +3,7 -1,9
18	4,0 +2,7 -1,3	4,5 +3,0 -1,7	5,0 +3,3 -1,7	+3,3 -1,7	5,6 +3,7 -1,9	6,3 +4,2 -2,1
19	4,4 +3,0 -1,5	5,0 +3,3 -1,7	5,6 +3,7 -1,9	+3,7 -1,9	6,3 +4,2 -2,1	7,1 +4,7 -2,4

## Назначение напусков

Напуски образуются за счет объемов металла между цилиндрическими и коническими поверхностями, образованными за счет уклонов, а также поверхностями в местах скруглений. Уклоны (рис. 8.13, 8.14, в) нужны для облегчения удаления поковки из штампа. Они составляют при

штамповке на молотах 7 и 10° (соответственно, для внутренних поверхностей  $\alpha_2$  и наружных  $\alpha_1$ ), см. рис. 8.14, в.

Скругления в местах пересечения поверхностей облегчают заполнение металлом полостей штампа (рис. 8.14, б), устраниют образование дефектов на поверхностях поковки (рис. 8.14, а) и снижают концентрацию напряжений в глубине полостей. Размеры наружных (для поковки) радиусов такие: при массе поковки от 3,0 до 6,3 кг и глубине ручья от 25 до 80 мм – 2,0–3,5 мм; при массе от 6,3 до 10,0 кг и глубине ручья от 25 до 100 мм – 3,0–4,0 мм.

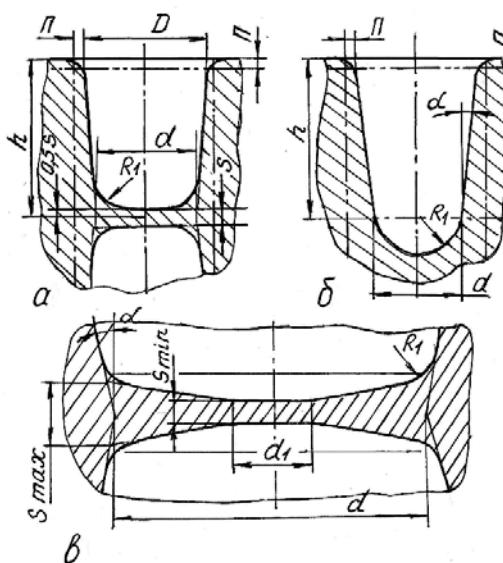


Рис. 8.13. Наметки в поковках под прошивку или сверление отверстий;  
н – припуск

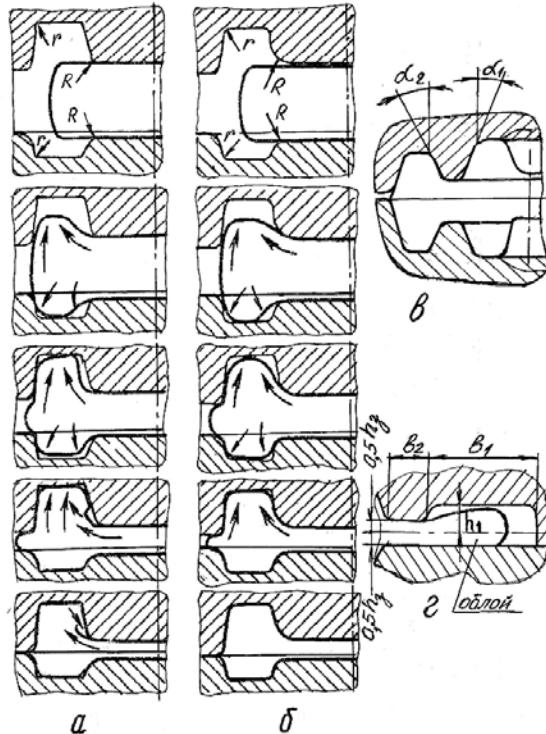


Рис. 8.14. Схемы процесса заполнения ручьев штампов при различных радиусах скругления кромок ручьев штампов: а – при малых радиусах; б – при достаточных скруглениях; в – уклоны; г – облойная канавка

Величина внутренних радиусов (для поковки) примерно в 3 раза больше соответствующих внешних.

### Разработка чертежа холодной поковки

При построении чертежа холодной поковки, размеры которой контролируются перед механической обработкой, используются данные предыдущих пунктов, описанных выше, а также учитывается то обстоятельство, что сквозные отверстия при штамповке на молоте получить нельзя. При диаметрах отверстий (в готовых деталях) более 30 мм полости «намечают».

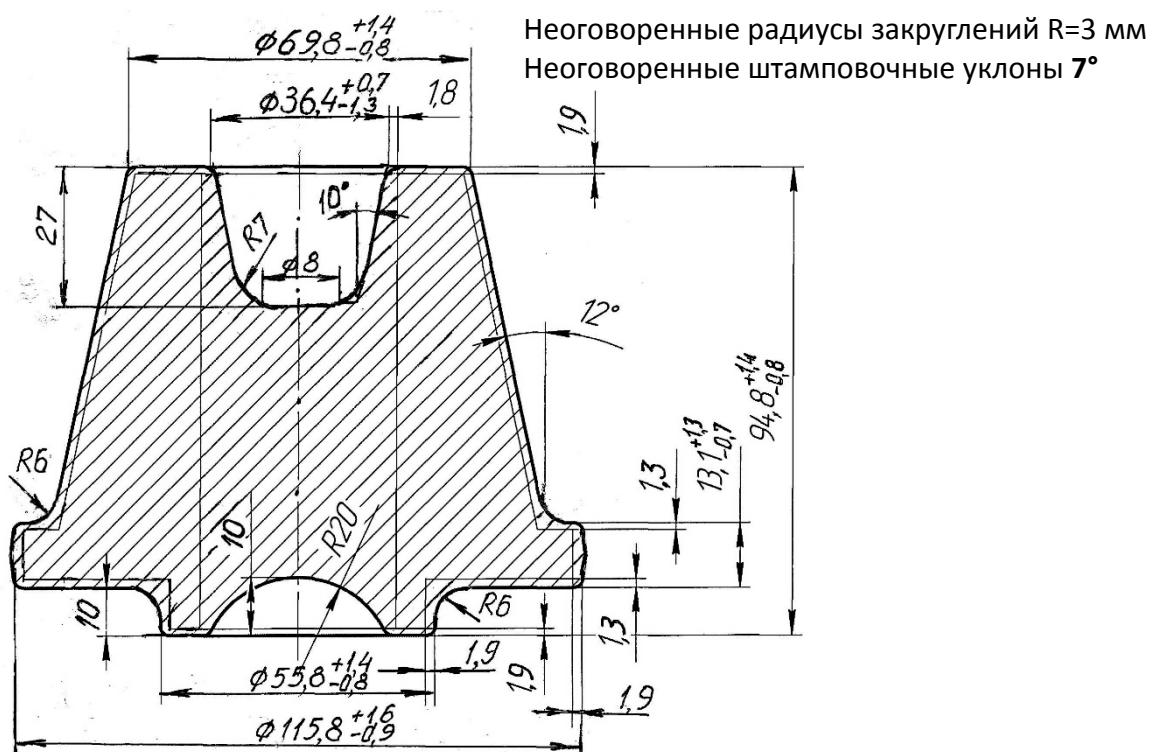


Рис. 8.15. Чертеж холодной поковки

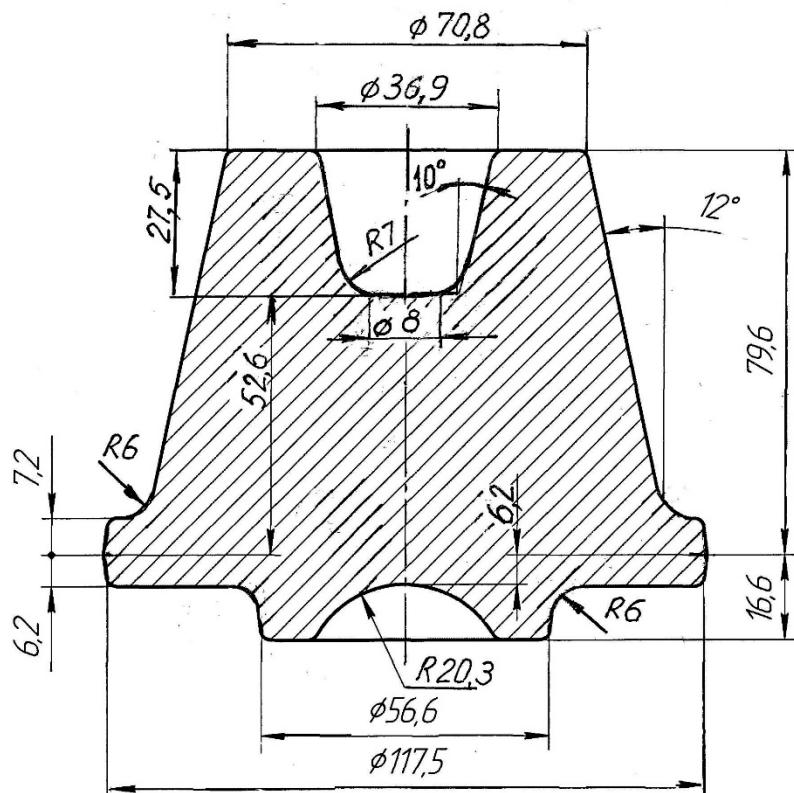


Рис. 8.16. Чертеж горячей поковки (все размеры по вертикали проставляются от плоскости разъема)

В поковке предусматривается перемычка (пленка), которая удаляется пробивкой. Пленка выполняется плоской (см. рис. 8.13, *a*) при диаметре отверстий менее 100 мм (толщина пленки определяется как  $S_o = (0,7 \dots 0,8) \cdot \sqrt{D}$ ). При диаметре отверстия больше 100 мм используется пленка с раскосом (рис. 8.13, *в*). Размеры ее такие:  $S_{\min} = 0,65 \cdot S_o$ ;  $S_{\max} = 1,35 \cdot S_o$ ;  $d_1 = 0,12 \cdot d + 3$ . Когда  $h/d \geq 1,7 - 2,0$ , то ограничиваются глухой прошивкой (рис. 8.13, *б*) при  $R_1 = 0,6 \cdot d$ .

Чертеж холодной поковки представлен на рис. 8.15. Тонкими линиями на чертеж поковки нанесен контур детали.

### Разработка чертежа горячей поковки

Чертеж горячей поковки (рис. 8.16) отличается тем, что все размеры увеличиваются на 1,5% и назначаются с округлением до десятых долей мм, размеры высотные проставляются от плоскости разъема.

### Определение размеров исходной заготовки

При открытой штамповке по плоскости разъема между нижней и верхней частями штампа формируется облой (заусенец, см. рис. 8.14, *г*), часть которого осаживается между плоской поверхностью одной из частей штампа и мостиком другой (шириной  $b_2$ ). Чем меньше зазор  $h_3$  и больше ширина мостика  $b_2$ , тем больше сопротивление истечению металла из полости штампа и тем больше вероятность полного заполнения ручьев. Но, соответственно, увеличивается усилие штамповки. Опыт, накопленный на производстве, позволил определить рациональные размеры облойных канавок (табл. 8.10), и, значит, объем металла, идущий в отход, будет

$$V_o = k \cdot S_o \cdot P_n,$$

где  $k$  – коэффициент заполнения металлом канавки для заусенца; для круглых поковок 0,5–0,64; для прочих форм 0,6–0,8;  $S_o$  – площадь поперечного сечения облойной канавки;  $P_n$  – периметр поковки при массе более 3 кг по контуру (точнее, длина линии, проходящей через центры тяжести поперечных сечений облоя в разных частях поковки).

Таблица 8.10

#### Размеры облойных канавок

Номер варианта	$h_3$ , мм	$h_1$ , мм	$b_2$ , мм	$b_1$ , мм	$S_o$ , $\text{мм}^2$
1	0,6	3	5	18	52
2	0,8	3	5	20	69
3	1,0	3	5	22	80
4	1,5	5	5	22	102

С учетом всех отходов объем металла, необходимый для получения поковки (объем заготовки), равен

$$V_3 = (V_n + V_o + V_{nep} + V_{kl}) \cdot K_y,$$

где  $V_n$  – объем поковки;  $V_o$  – объем облоя;  $V_{nep}$  – объем перемычки (принимается равным  $0,25 \cdot V_o$ );  $V_{kl}$  – объем клещевины (объем части заготовки, за которую еедерживают клещами);  $K_y$  – коэффициент, учитывающий угар металла при нагреве (1,01 – при нагреве в электропечи, 1,02 – при нагреве в пламенной печи).

Диаметр исходной заготовки (при штамповке круглой поковки) равен

$$D_{заг} = 1,08 \cdot \sqrt[3]{V_3/m},$$

где  $m = H_{заг}/D_{заг}$  (при осадке заготовки в торец  $m \leq 2,0$ ).

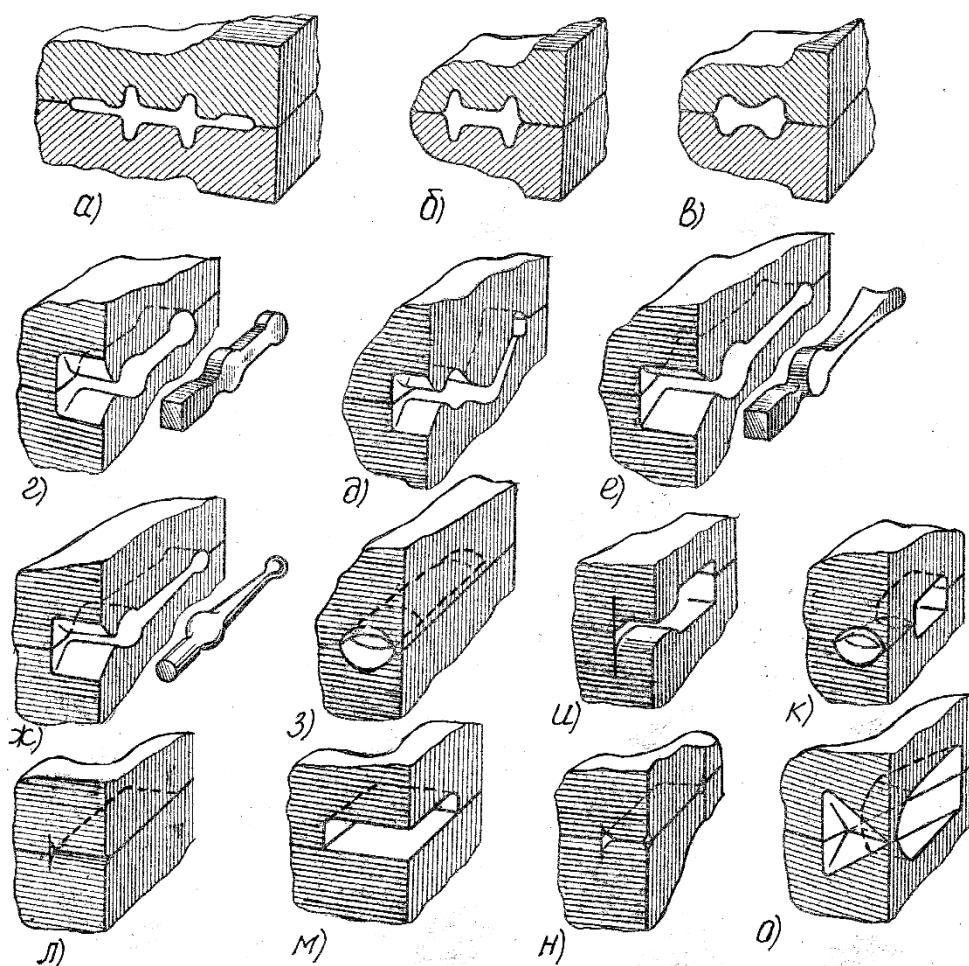


Рис. 8.17. Виды ручьев штампов для объемной штамповки

*Примечание.* На молотах и прессах могут изготавливаться поковки двух групп: 1) круглые и квадратные в плане; 2) удлиненные в плоскости разъема. При штамповке поковок второй группы приходится применять ручьи следующих видов (рис. 8.17): окончательный (а), предварительный (б), заготовительно-предварительный (в) – штамповочные; заготовитель-

*ные* – формовочный (*з*), гибочный (*д*), пережимной (*е*), подкатной (*ж, з*), протяжной (*и, к*), оттяжной (*л*), для осадки и разгонки (*м, н*); *отрезной* (*о*). Такое разнообразие ручьев позволяет за несколько последовательных операций изготавливать поковки весьма сложной формы (шатуны, вилки, изогнутые рычаги, кривошипы, коленчатые валы, крестовины, рычаги с отростками и т.д.).

## **Порядок выполнения работы**

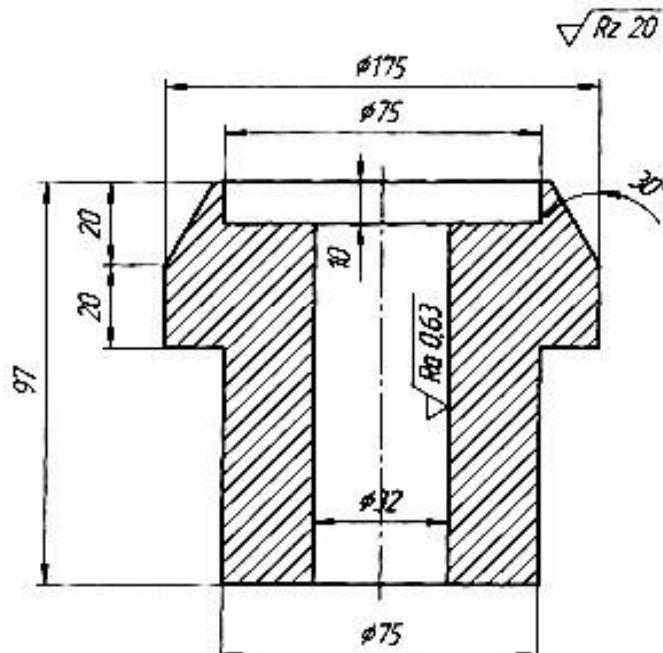
1. Изучить технологические особенности основных способов горячей объемной штамповки машиностроительных деталей.
2. Изучить технологические особенности горячей объемной штамповки деталей в открытых штампах, а также последовательность разработки чертежей холодной и горячей поковки.
3. На чертеже детали, выданном преподавателем (*из приложения*), показать плоскость разъема штампа и положение поковки в штампе.
4. Определить величины припусков и допусков на механическую обработку поковки и указать их на чертеже холодной поковки; определить форму и размеры наметок отверстий.
5. Назначить напуски, штамповочные уклоны, внутренние и внешние радиусы ручьев штампов.
6. Вычертить чертеж горячей поковки.
7. Определить размеры исходной заготовки с учетом укладки ее в ручьи штампа и отношения допустимого соотношения размеров.
8. В лаборатории кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» изучить на практике конструкцию опытного штампа и произвести штамповку поковки детали «шестерня» с анализом постадийного формоизменения (последнее зафиксировать в отчете).

## **Контрольные вопросы и задания**

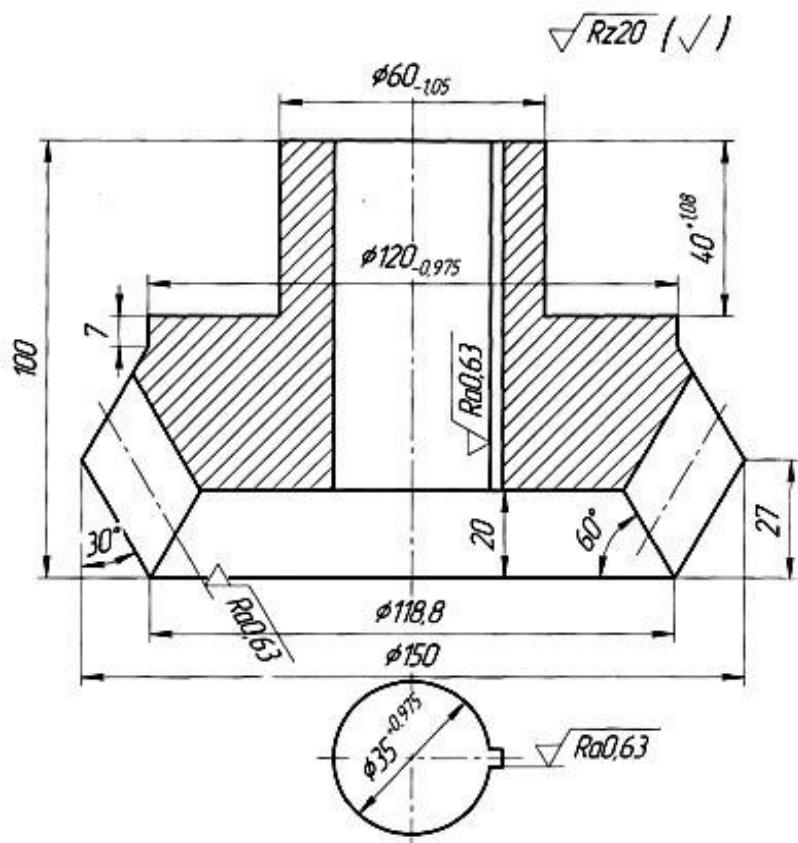
1. Перечислите методы производства заготовок.
2. Как определяется экономичность производства заготовок?
3. Какие факторы являются определяющими при выборе способа производства заготовки?
4. Какое оборудование применяется при горячей объемной штамповке?
5. Как должна располагаться поковка в штампе?
6. Что такое исходный индекс, как он определяется?
7. Как определяется степень сложности поковки?
8. К какой группе сталей относятся стали марок 30ХГТ, сталь 30, 30ХН3А, 50Х, 60С2, 12ХН3А, ШХ15, 38ХС, 30ХГСА?
9. От каких параметров зависит припуск на механическую обработку детали?

10. Каков принцип определения исходного индекса?
11. При каких размерах отверстий в деталях можно намечать их в поковках под прошивку?
12. Назовите типы заготовок, получаемых горячей объемной штамповкой на молотах, КГШП и ГКМ.
13. Почему на чертеже горячей поковки все размеры по вертикали проставляются от плоскости разъема?
14. В чем заключается назначение облойной канавки?
15. Почему мостик облойной канавки чаще всего выполняется на верхней половине штампа?
16. Как выбираются штамповочные уклоны, каково их назначение?
17. Зачем назначается припуск?
18. Как удаляются перемычки в наметках отверстий?
19. Чем отличается инструмент ГКМ от инструментов ПГШМ КГШП?
20. Зачем скругляют наружные кромки полостей штампов и переход от дна полостей к стенкам?
21. Почему допускаемые отклонения, большие по величине, назначаются со знаком + (плюс) на наружные поверхности поковки и со знаком – (минус) на внутренние поверхности?
22. В чем заключается назначение магазина облойной канавки?

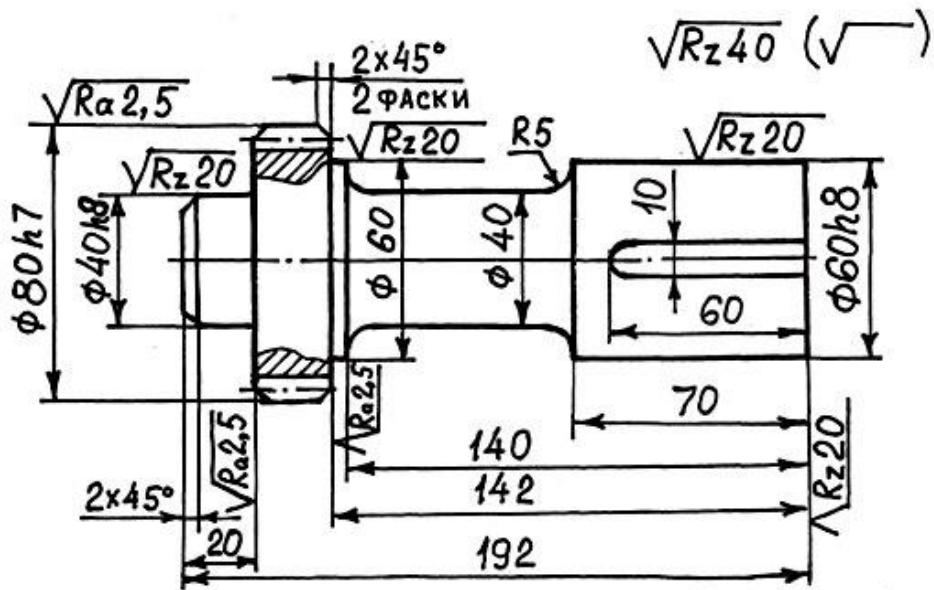
### Приложение



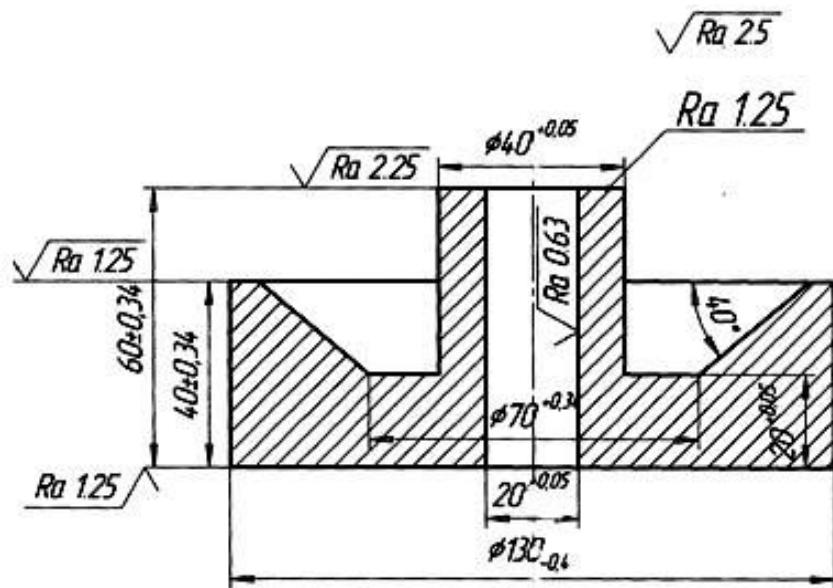
Деталь № 1 – опора; сталь 18ХГТ



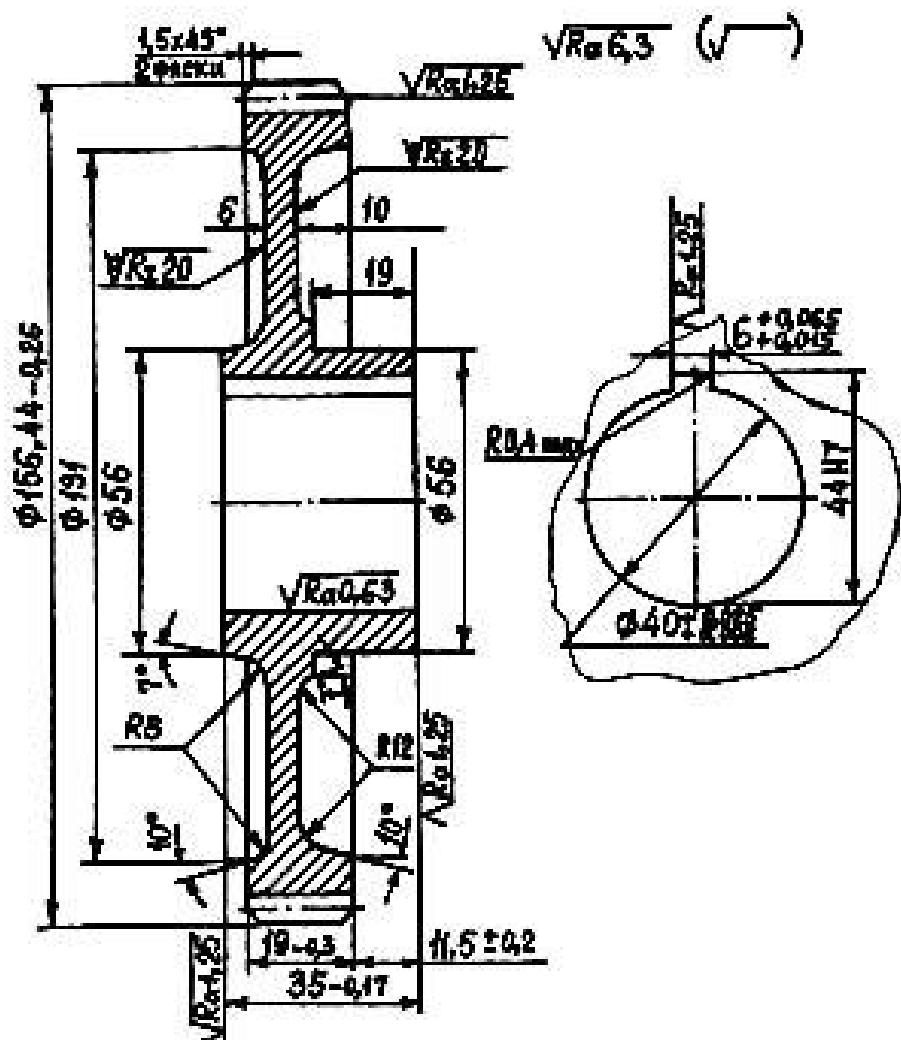
Деталь № 2 – шестерня коническая; сталь 35Х



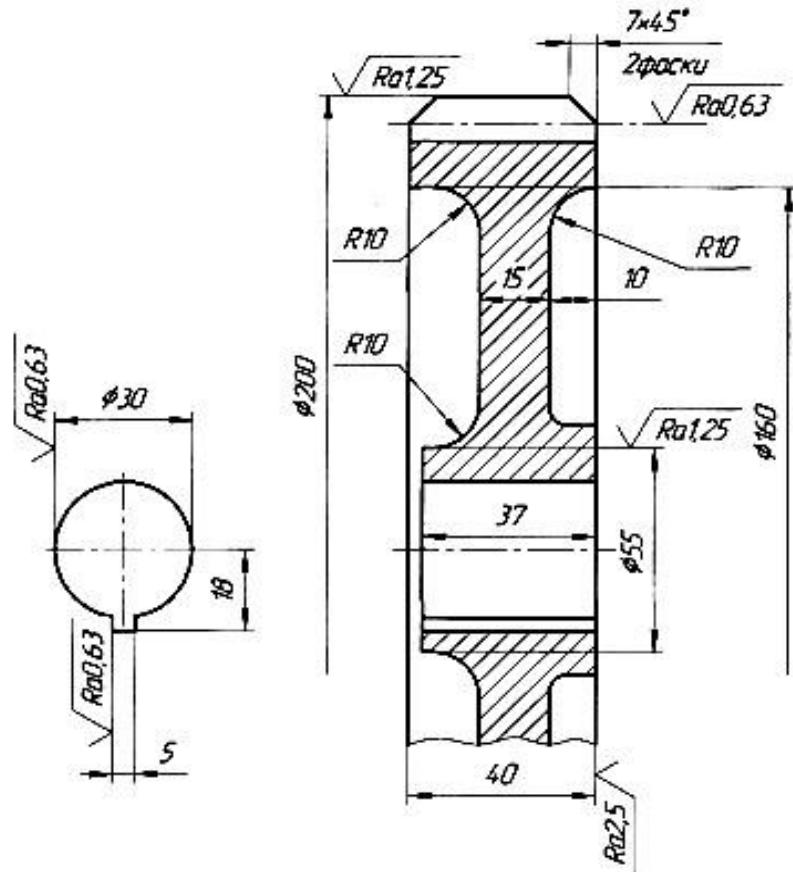
Деталь № 3 – валик привода; сталь 40ХН



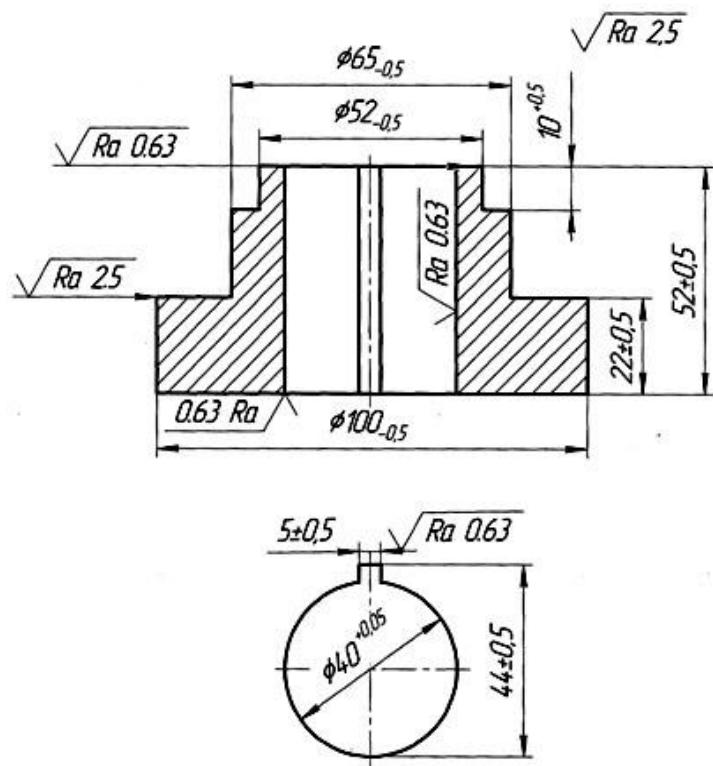
## Деталь № 4 – ролик опорный; сталь АС38ХГМ



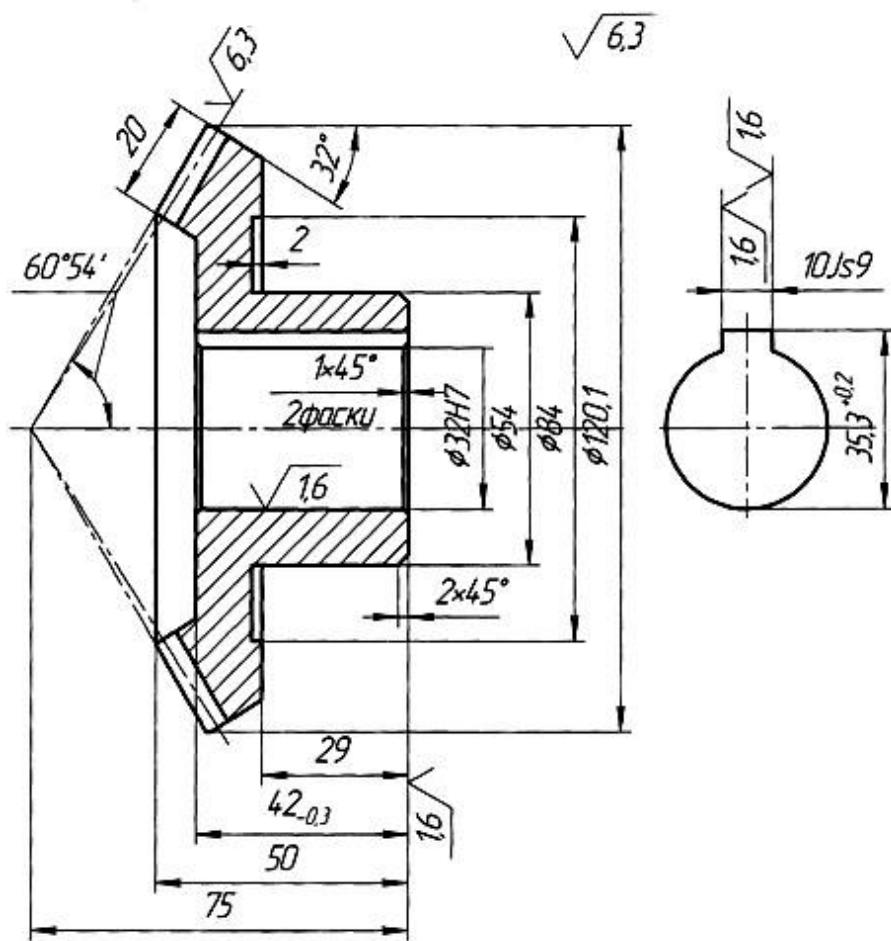
### Деталь № 5 – шестерня; сталь 25ХГТ



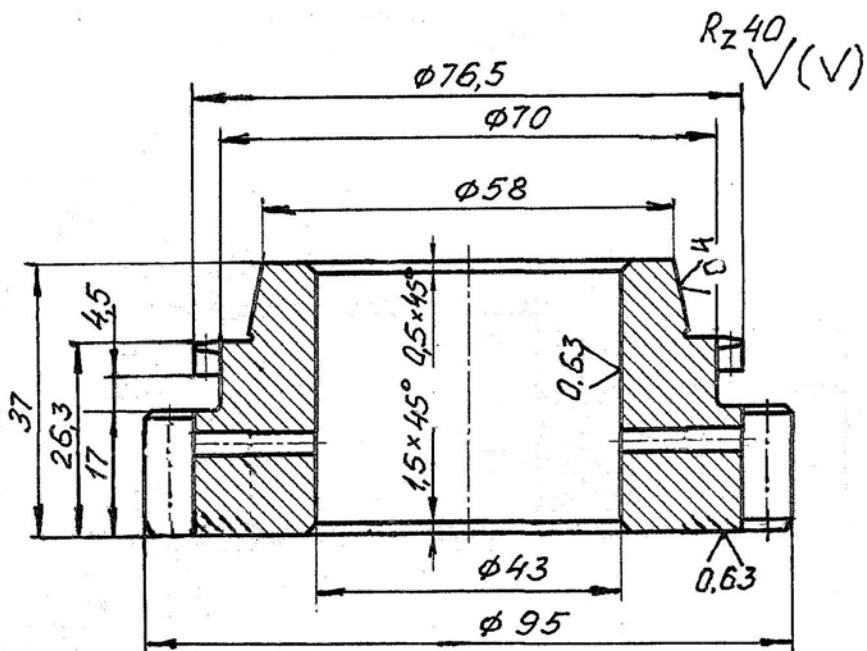
## Деталь № 6 – шестерня; сталь 38 ХС



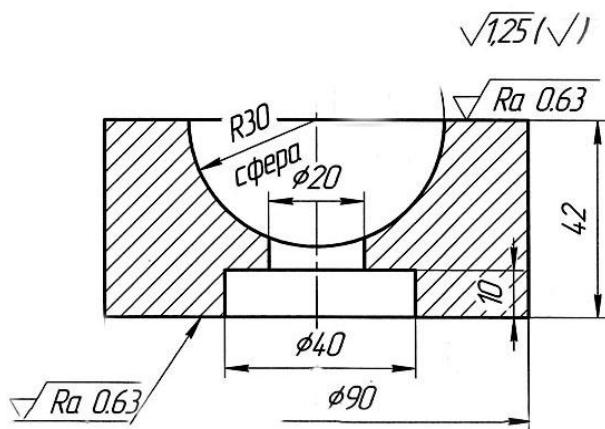
## Деталь № 7 – втулка; сталь 30ХГСА



Деталь № 8 – шестерня коническая; сталь 40ХН



## Деталь № 9 – блок шестерен; сталь 40ХН



Деталь № 10 – опора шаровая; сталь 50ХГФА

### *Лабораторная работа № 9*

## **РУЧНАЯ ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА**

**Цель работы:** ознакомление с основами технологии ручной электродуговой сварки стали покрытыми электродами и методом определения влияния режимов сварки на величину технологических коэффициентов.

### **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РУЧНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКЕ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ**

#### **Электрическая сварочная дуга, ее характеристики**

Источником тепла, необходимого для расплавления металла при дуговой сварке, является электрическая дуга – мощный стабильный электрический разряд в ионизированной атмосфере газов и паров металла [5].

При ручной дуговой сварке стали покрытыми электродами возбуждение дуги осуществляется за счет короткого замыкания электрода на изделие. Когда сварщик на мгновение касается электродом свариваемого изделия (или «чиркает» по его поверхности), происходит зажигание дуги.

Сварка выполняется на постоянном или переменном токе. При использовании постоянного тока применяют прямую и обратную полярность. Если минус источника питания подключается к электроду, а плюс – к изделию (рис. 9.1), то такая полярность называется прямой.

Если подключение дуги выполняется наоборот, то полярность считается обратной.

При выборе полярности необходимо учитывать неравномерность распределения тепловой энергии в различных зонах дуги. Так, в зоне катода выделяется около 36% тепла, в зоне анода – примерно 43%. Остальная тепло-

вая энергия выделяется в наиболее протяженной части дуги – столбе дуги. В этих условиях температура в зоне катода составляет около 2800–3200 К, в зоне анода – примерно 3200–3400 К, а у оси столба дуги – около 5730–7730 °С. Если электроды предназначены для сварки на обратной полярности, надо обязательно проверить подключение: (–) на изделии, (+) на электроде, иначе дуга будет обрываться или будет происходить зашлаковка шва. Причиной этого является меньшее количество выделяемого тепла на электроде. В результате образуется козырек из покрытия, который расщепляется, а куски его попадают в жидкую ванну.

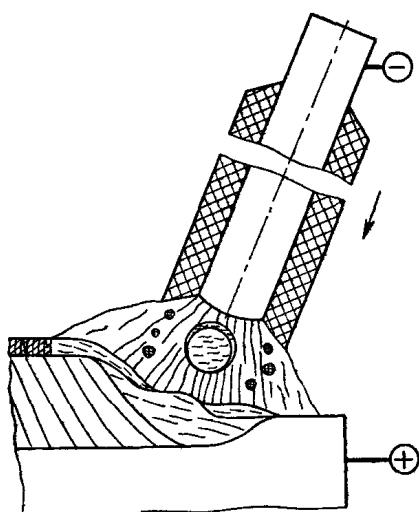


Рис. 9.1. Схема подключения источника сварочного тока при прямой полярности

Одной из важнейших характеристик электрической сварочной дуги является ее статическая вольт-амперная характеристика. Это зависимость напряжения дуги от силы сварочного тока, взятая при постоянной длине дуги (рис. 9.2).

Характеристика состоит из трех участков: I – падающего, II – жесткого, III – возрастающего. Для ручной дуговой сварки рабочим является жесткий участок этой характеристики.

При выборе источника питания дуги необходимо знать его внешнюю характеристику. Под внешней характеристикой источника питания дуги понимают зависимость напряжения, вырабатываемого источником, от силы сварочного тока.

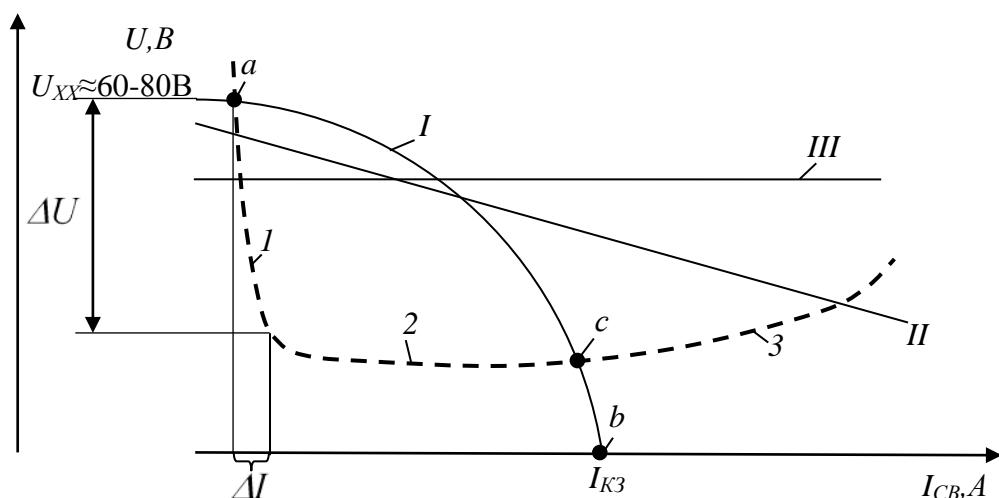


Рис. 9.2. Статическая вольт-амперная характеристика дуги:  
(---) и внешние характеристики источников питания дуги  
I – падающая; II – пологая; III – жесткая

Источники питания сварочной дуги могут иметь падающую (I), пологопадающую (II) и жесткую (III) характеристики (см. рис. 9.2).

Для питания дуги при ручной дуговой сварке необходим источник тока, имеющий падающую внешнюю характеристику (см. рис. 9.2). Здесь  $U_{XX}$  – напряжение холостого хода; точка  $a$  – точка нестабильного горения дуги, то есть дуга может при этом гореть, но нужно строго соблюдать длину дуги, что при ручной сварке практически выдержать нельзя, поэтому на этом режиме сварку не ведут. Изменение нагрузки на  $\Delta I$  приводит к большим колебаниям напряжения  $\Delta U$  и дуга гаснет; точка  $c$  – точка стабильного горения дуги, когда небольшие изменения нагрузки  $\Delta I$  практически не меняют напряжение, то есть  $\Delta U$  очень мало и дуга горит стablyно;  $I_{K3}$  (точка  $b$ ) – ток короткого замыкания.

### **Ручная дуговая сварка стали покрытыми электродами.**

#### **Краткая характеристика процесса**

Область применения процесса – сварка стальных изделий с короткими и прерывистыми швами сложной конфигурации, когда применение автоматизированных процессов сварки затруднено [5].

Достоинствами данного вида сварки являются: 1) возможность проведения сварки в любом пространственном положении (нижнем, вертикальном, потолочном), что особенно важно при монтажных работах и сборке конструкций сложной формы; 2) универсальность по маркам свариваемых материалов.

К недостаткам ручной дуговой сварки следует отнести: 1) трудности, связанные со сваркой тонких листовых заготовок (толщиной менее 1 мм); 2) невысокую производительность; 3) значительную зависимость качества сварного шва от квалификации сварщика; 4) длительный срок обучения сварщика высокой квалификации.

### **Режимы ручной дуговой сварки**

Режим ручной дуговой сварки диаметром электрода  $d$  и силой сварочного тока  $I$  (табл. 9.1). Длина дуги обычно составляет 0,5–1,1 от величины диаметра электрода и вручную поддерживается сварщиком на постоянном уровне.

Сварочный ток  $I$  определяется по соотношению

$$I = k d,$$

где  $k$  – опытный коэффициент (для электродов из низкоуглеродистых сталей  $k = 40$ – $60$ , для электродов из высоколегированных сталей  $k = 35$ – $40$ ), А/мм.

Таблица 9.1

**Рекомендации по выбору диаметра электрода**

Толщина листа, мм	1–2	3–5	4–10	12–24 и более
Диаметр электрода, мм	2–3	3–4	4–5	5–6

**Электроды для ручной дуговой сварки**

Электрод представляет собой стальной стержень с нанесенным на него покрытием. Один конец электрода на 30–40 мм очищен от покрытия для закрепления в электрододержатель.

Электрод характеризуется маркой сварочной проволоки, типом электрода, маркой электрода.

Марка сварочной проволоки содержит информацию о химическом составе стального стержня электрода, тип электрода указывает механические свойства и химический состав сварного шва, марка электрода определяет технологию сварки.

Марка сварочной проволоки обозначается буквами «Св» (сварочная) и следующими далее цифрами и буквами. Первые две цифры показывают содержание углерода в сотых долях процента. Буква «А» в конце марки сварочной проволоки означает пониженное содержание вредных примесей (серы и фосфора). Содержание легирующих элементов в марке сварочной проволоки задается так же, как в марках легированных сталей: вначале указывается буква, обозначающая название легирующего элемента, затем среднее содержание этого элемента в целых процентах. Если после буквы соответствующего легирующего элемента цифра отсутствует, то содержание легирующего элемента составляет 1–1,5%. Буквы в марках сварочной проволоки из легированных сталей обозначают наличие следующих легирующих элементов: «Х» – хрома, «Н» – никеля, «М» – молибдена, «В» – вольфрама, «К» – кобальта, «Г» – марганца, «С» – кремния, «Ф» – ванадия, «Т» – титана, «Д» – меди, «Ю» – алюминия и т. д.

Примеры маркировки стальной сварочной проволоки: *Св-08* – содержание углерода 0,08% (сталь качественной выплавки); *Св-08А* – содержание углерода 0,08% (сталь высококачественной выплавки, с пониженным содержанием вредных примесей серы и фосфора); *Св-08Г2С* – содержание углерода 0,08%, марганца – 2%, кремния – 1%; *Св-10Х13* – содержание углерода 0,1%, хрома – 13%; *Св-04Х19Н9С2* – содержание углерода 0,04%, хрома – 19%, никеля – 9%, кремния – 2%.

Для ручной дуговой сварки применяют стальные стержни из сварочной проволоки. На них наносится покрытие, обеспечивающее стабильное горение дуги. В состав покрытия входят вещества:

*газообразующие* – неорганические (мрамор, магнезит и др.) и органические (крахмал, древесная мука, целлюлоза, декстрин и др.) вещества;

*шлакообразующие* – руды (титановая и марганцевая руда), различные минералы (полевой и плавиковый шпаты, гранит, кремнезем и др.);

*раскислители* (кремний, марганец) и легирующие вещества (*Ti*, *Cr*, *Ni* и др.);

*связующие* – водный раствор жидкого стекла;

*формовочные добавки* – они придают покрытию повышенную пластичность (бетонит, каолин, декстрин, слюда и др.).

Для устойчивого горения дуги в покрытие также вводят вещества с низким потенциалом ионизации (соли щелочных металлов, калиевое и натриевое жидкое стекло и др.).

Таблица 9.2

#### Классификация электродов для ручной дуговой сварки

Тип электрода	Относительное удлинение, %	Назначение
Э70 Э85 Э100 Э125 Э150	14 12 10 8 6	Сварка легированных конструкционных сталей повышенной и высокой прочности с времененным сопротивлением $\sigma_e > 600$ МПа
Э55 Э60	20 18	Сварка углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с $\sigma_e \leq 600$ МПа
Э38 Э42 Э46 Э50	14 18 18 16	Сварка углеродистых и низколегированных сталей с $\sigma_e \leq 500$ МПа
Э42А Э46А Э50А	22 22 20	Сварка углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с повышенными требованиями к пластичности и ударной вязкости
ЭН-у30Х28С4Н4-50	Твердость слоя HRC = 50	Для наплавочных работ и относительно высокой ударной вязкости наплавки

Все электроды для ручной сварки можно разделить на следующие группы:

В – для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами (49 типов);

Л – для сварки легированных конструкционных сталей с времененным сопротивлением разрыву выше 600 МПа (5 типов);

Т – для сварки легированных теплоустойчивых сталей (9 типов);

У – для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву: а)  $\sigma_e \leq 600$  МПа; б)  $\sigma_e > 600$  МПа;

М – для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами (44 типа).

Пример марки электродов: ЭН-У30Х28С4Н4-50. В приведенной марке наплавочных электродов имеется повышенное содержание углерода У30 в десятых долях %, цифра в конце (50) – твердость слоя по Роквеллу.

В табл. 9.2 приведена классификация электродов для ручной дуговой сварки.

### Технологические коэффициенты при ручной дуговой сварке стали

При выборе оптимальных режимов ручной сварки проводится расчет технологических коэффициентов, определяющих технико-экономические показатели сварки: 1) коэффициент расплавления; 2) коэффициент наплавки; 3) коэффициент потерь электродного металла.

*Коэффициент расплавления* представляет собой массу электродного металла в граммах, расплавленного за 1 ч горения дуги, отнесенную к силе тока

$$\alpha_p = \frac{Q_p \cdot 3600}{I_{CB} \cdot t},$$

где  $Q_p$  – масса расплавленного металла электрода, г;  $I_{CB}$  – сила сварочного тока, А;  $t$  – время сварки, с.

Массу расплавленного электрода определяют по формуле

$$Q_p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \gamma (l_1 - l_2) = \mu \cdot (l_1 - l_2),$$

где  $d$  – диаметр стального стержня электрода, см;  $\gamma$  – удельная масса металла электрода, г/см<sup>3</sup>;  $\mu = (\pi \cdot d^2 \cdot \gamma)/4$  – масса одного погонного сантиметра стержня, г;  $l_1$  – длина электрода до сварки, см;  $l_2$  – длина огарка, см. Для стержня диаметром  $d=4$  мм масса погонного сантиметра стержня  $\mu=0,98$  г/см.

*Коэффициент наплавки* показывает количество металла электрода в граммах, наплавленного на свариваемое изделие за 1 ч горения дуги, отнесенное к силе тока:

$$\alpha_h = \frac{Q_h \cdot 3600}{I_{CB} \cdot t},$$

где  $Q_h$  – масса наплавленного на изделие металла, г;  $I_{CB}$  – сила сварочного тока, А;  $t$  – время сварки, с.

Масса наплавленного металла  $Q_H$  определяется путем взвешивания изделия (пластины, на которую наплавляется металл) до и после сварки:

$$Q_H = G_1 - G_2,$$

где  $G_1$  – масса пластины до сварки, г;  $G_2$  – масса пластины после сварки, г.

Перед взвешиванием пластины необходимо удалить шлак с поверхности сварного шва. Во время удаления шлака необходимо пользоваться защитными очками и голицами.

*Коэффициент потерь* электродного металла представляет отношение металла, потеряного при сварке на окисление, разбрызгивание и испарение, ко всей массе расплавленного металла электрода

$$\psi = \frac{Q_P - Q_H}{Q_P} \cdot 100\%,$$

где  $Q_P$  – масса расплавленного металла электрода, г;  $Q_H$  – масса наплавленного на изделие металла электрода, г.

Для правильного выбора режимов сварки нужно учитывать значимость указанных выше коэффициентов. По значимости коэффициенты можно различить следующим образом:

1. Коэффициент наплавки  $\alpha_H$  (определяет произвольность процесса сварки). Чем больше значение  $\alpha_H$ , тем меньше основное время сварки, так как

$$t_o = \frac{3600 \cdot Q_H}{I_{CB} \cdot \alpha_H},$$

где  $t_o$  – основное время сварки (когда горит дуга).

2. Коэффициент потерь  $\psi$ . Чем меньше потери, тем лучше режим сварки.

3. Коэффициент расплавления  $\alpha_P$ . Но необходимо помнить, что  $\alpha_H$  и  $\alpha_P$  зависят друг от друга, поэтому часто используется при расчетах режимов сварки именно  $\alpha_P$ .

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА СВАРКИ

### Оборудование, инструмент и приспособления для проведения экспериментальной части лабораторной работы

1. Сварочный пост для ручной дуговой сварки.
2. Источник питания сварочной дуги.
3. Аналитические весы.
4. Масштабная линейка.
5. Сварочные электроды.

6. Стальные пластины (под наплавку).
7. Защитные маски, защитные очки.
8. Слесарный инструмент (молоток, зубило).
9. Плоскогубцы.
10. Секундомер.

Наплавку образцов выполняет учебный мастер, остальные операции по взвешиванию, измерению и расчету технологических коэффициентов проводят студенты.

### **Порядок выполнения экспериментальной части работы**

К работе допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

1. Ознакомиться с содержанием теоретической части работы и составить краткий конспект.
2. Наметить электроды и пластины для каждой наплавки. Эксперименты по наплавке проводятся с использованием электродов одинакового диаметра и марки, при трех значениях сварочного тока.
3. Измерить длину каждого электрода и взвешиванием определить массу каждой пластины до наплавки.
4. Произвести наплавку всех пластин на выбранных режимах (этую операцию производит учебный мастер, прошедший аттестацию по дуговой сварке).
5. Измерить длину полученных после наплавки огарков электродов.
6. После наплавки взять плоскогубцами пластину и, охладив наплавленные швы под краном проточной холодной водой, после просушки пластины ударами слесарного инструмента (молотка или зубила) удалить с поверхности пластины шлак и брызги застывшего металла.
7. Взвешиванием определить массу пластины после наплавки.
8. Произвести расчет технологических коэффициентов при использованных режимах сварки, данные занести в табл. 9.3.

Таблица 9.3

#### **Результаты эксперимента**

Номер опыта	$I$ , А	$t$ , с	Длина электрода, см		$Q_P$ , г	Масса пластины, г		$Q_H$ , г	$\alpha_P$ , г/А·ч	$\alpha_H$ , г/А·ч	$\psi$ , %
			$l_1$	$l_2$		$G_1$	$G_2$				
1											
2											
3											

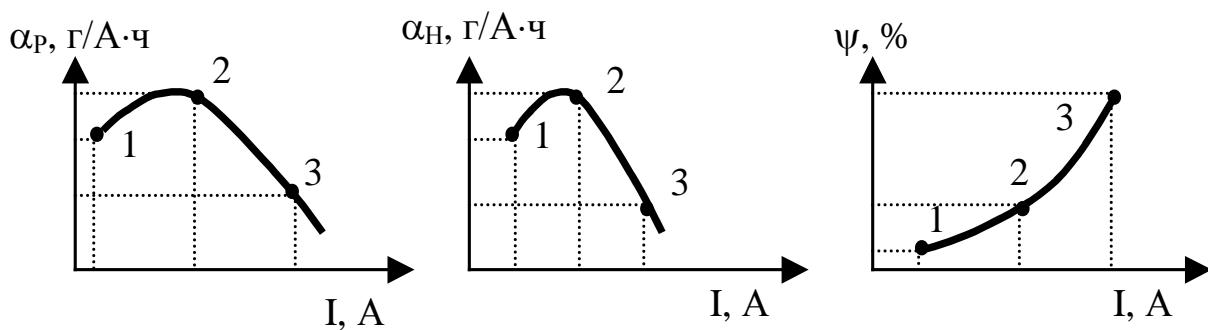


Рис. 9.3. Графики зависимости технологических коэффициентов от силы сварочного тока

9. На основании экспериментальных данных построить графики зависимости технологических коэффициентов от силы сварочного тока. Форма кривых будет иметь вид, подобный изображенным на рис. 9.3.

10. Сделать вывод о том, какой из изученных режимов является оптимальным. Помня значимость коэффициентов и анализируя графики, можно сказать, что режим сварки будет тем лучше, чем большее значение  $\alpha_H$  и меньше значение  $\psi$ . Судя по приведенным графикам, это режим точки 2. При некотором росте  $\psi$  значение  $\alpha_H$  будет максимально.

11. Защита работы тестированием.

### Контрольные вопросы

1. В чем сущность электрической сварочной дуги?
2. Что такое статическая вольт-амперная характеристика дуги?
3. Что такая внешняя характеристика источника питания электрической дуги?
4. Какой должна быть внешняя характеристика источника питания дуги при ручной дуговой сварке покрытыми стальными электродами?
5. С какой целью при ручной дуговой сварке стали производят короткое замыкание?
6. Укажите, чем отличается прямая полярность при дуговой сварке от обратной полярности?
7. Укажите, в какой зоне сварочной дуги выделяется большее количество тепловой энергии: у катода или у анода?
8. Какую информацию дает марка стальной сварочной проволоки?
9. Расшифруйте две марки сварочной проволоки Св-08 и Св-08А и укажите, в чем разница между ними?
10. Расшифруйте типы электродов Э42 и Э42А и укажите, в чем разница между ними?
11. Почему режим в области точки 2 (рис. 9.3) является оптимальным?

12. Почему значениям коэффициента  $\alpha_H$  отдается предпочтение при выборе оптимального режима?

13. С какой целью в состав покрытий стальных электродов вводят вещества, снижающие потенциал ионизации паров металла?

14. Для чего в составе покрытий стальных электродов содержатся газообразующие компоненты?

15. Какую роль в процессе сварки играют шлакообразующие вещества, входящие в состав покрытий электродов?

16. С какой целью в состав покрытий электродов вводят компоненты-раскислители?

17. Для чего в состав покрытий стальных электродов вводят жидкое стекло?

18. С какой целью в состав покрытий электродов вводят легирующие элементы?

## Лабораторная работа № 10

### ПОЛУЧЕНИЕ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

**Цель работы:** ознакомление с принципами выбора способа литья, расчетом припусков на механическую обработку отливки по заданному чертежу детали, конструированием песчано-глинистой литейной формы.

#### Основные способы литья

Значение литейного производства исключительно велико. Литьем получают детали как простой, так и очень сложной формы (с внутренними полостями, ребрами и каналами), которые невозможно или очень трудно получить другими способами [5]. Например, станины крупных станков, прессов и прокатных станов, блоки цилиндров двигателей внутреннего сгорания (рис. 10.1), пустотелые лопатки турбин, корпуса мостов автомобилей, корпусные детали насосов и др. В тракторостроении и производстве дорожно-строительных машин масса литых деталей составляет около 60%.

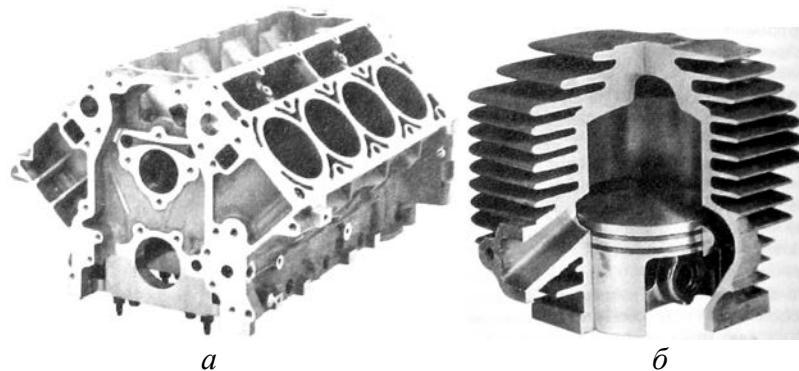


Рис. 10.1. Блоки цилиндров двигателей, полученные методом литья:  
*a* – четырехтактного; *б* – двухтактного

Метод литья заключается в заливке расплавленного металла в специально подготовленную литейную форму (песчаную, керамическую, металлическую), неподвижную или вращающуюся [5].

### *Литье в разовые песчано-глинистые формы*

Наиболее распространенным способом получения заготовок деталей машин является литье в разовые песчано-глинистые формы (до 80% всех отливок по массе металла). Способ не имеет ограничений по массе, размерам и сложности деталей, но уступает другим способам литья только по качеству поверхности отливок и точности [5].

Процесс приготовления литейных форм называется формовкой. Литейная форма обычно состоит из нижней и верхней полуформ, которые изготавливают (формуют) в металлических опоках – приспособлениях для удержания формовочной смеси.

К формовочным материалам относятся формовочные и стержневые смеси, а также материалы, применяемые при изготовлении этих смесей:

- кварцевый песок, обладающий высокой огнеупорностью (до 1700 °C), твердостью, прочностью;
- формовочная глина, обеспечивающая сырую прочность и пластичность смесей (каолиновая, бентонит);
- оборотная смесь (смесь б/у);
- связующие вещества (сульфатцеллюлозный щелок, жидкое стекло и др.);
- специальные добавки для предотвращения пригора.

Формовка выполняется следующим образом. Формовщик устанавливает опоку низа и нижнюю половинку модели (рис. 10.2, *а*) на модельную плиту (рис. 10.2, *б*), оставляя место для литниковой системы. Модель правляют (припудривают или обрызгивают) разделительным составом для предотвращения прилипания формовочной смеси, а затем наполняют формовочной смесью. Смесь утрамбовывают. Излишки смеси срезают линейкой; вентиляционной иглой накалывают вентиляционные каналы; сверху устанавливают подопочную плиту, вместе с которой переворачивают уплотненную полуформу. Плоскость разъема посыпают мелким разделительным песком.

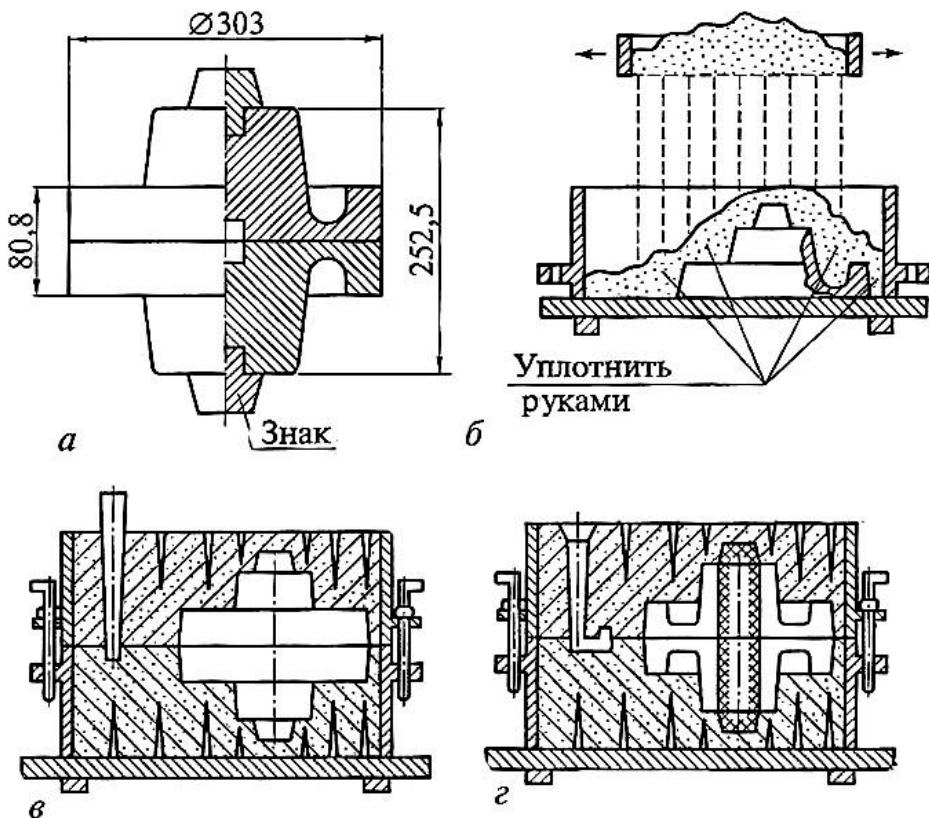


Рис.10.2. Формовка по разъемной модели: *а* – модель шкива с отверстием в ступице; *б* – формовка полуформы; *в* – форма после второй операции формовки [4]; *г* – форма после извлечения модели, установки стержня, отделки литниковой системы

После этого устанавливают верхнюю половину модели, совмещая ее с нижней половиной, опоку верха и модели элементов литниковой системы (рис. 10, *в*). Следует формовка верхней полуформы. Затем вырезают литниковую воронку или чашку, извлекают модель стояка, снимают верхнюю полуформу, вынимают половинки модели и модели элементов литниковой системы, выполняют отделку формы. В полуформу устанавливают стержни, накрывают нижнюю полуформу верхней. Для центрования полуформ применяют штыри и втулки.

На рис. 10.3 показана формовка с горизонтальным расположением оси модели (и разъема).

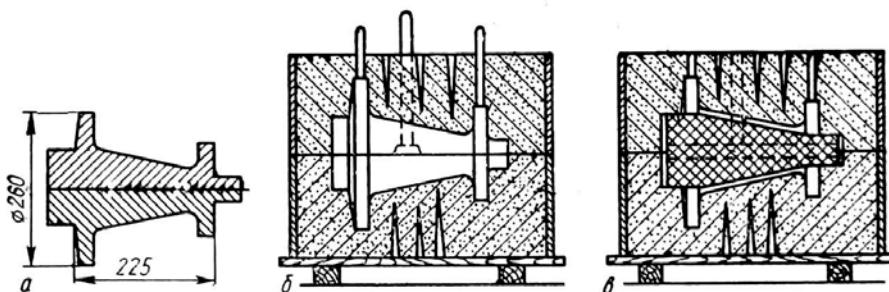


Рис. 10.3. Формовка по разъемной модели: *а* – эскиз модели; *б* – заформованная разъемная модель; *в* – форма со стержнем после извлечения частей модели из полуформ

В литейном производстве используются многочисленные способы формовки, позволяющие снизить трудоемкость изготовления форм. Например, формовку производят не разнимая опоки, а только переворачивая их в сборе (рис. 10.4, *a*, *b*). Модели верха и низа закрепляются на промежуточной пластине, которая после формовки полуформ снимается с центрирующих штырей и удаляется. Полуформы совмещаются.

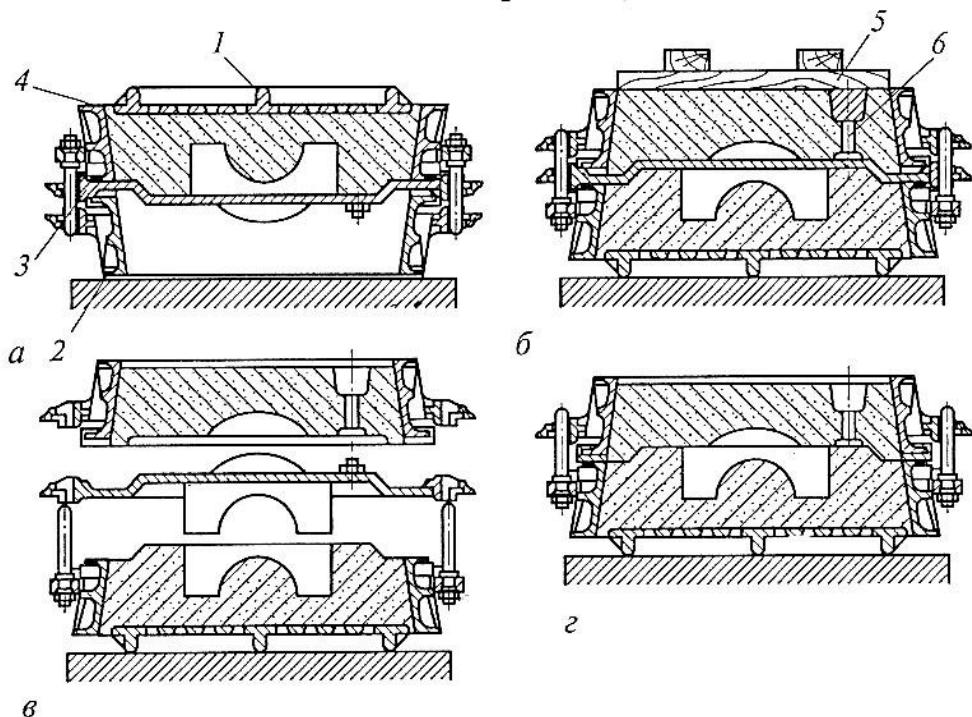


Рис. 10.4. Формовка по моделям, закрепленным на промежуточной плите: 1 – плита; 2, 4 – опоки верхняя и нижняя; 3 – штыри; 5 – подопочная плита; 6 – стояк с чашей

В настоящее время применяется прогрессивная технология, предложенная фирмой DANSK INDUSTRY SYNDIKAT, которая состоит в том, что формовка полуформ производится в камере с противоположных сторон песчано-глинистого блока. Затем блоки выталкиваются на конвейер, где при смыкании образуют форму под заливку металлом (рис. 10.5).

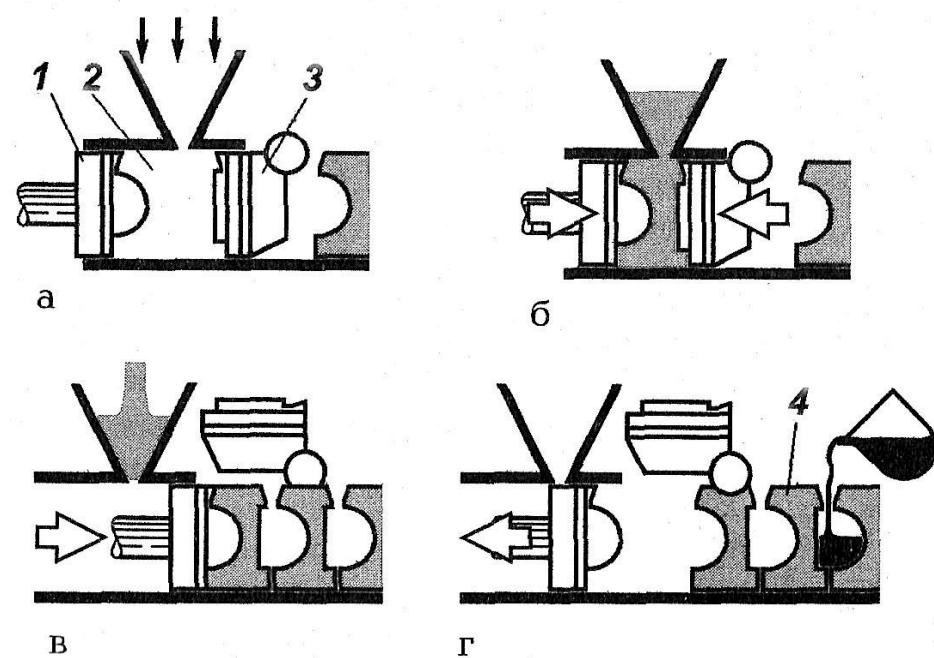


Рис. 10.5. Последовательность формирования полуформ и заливки металла на машине типа DISAMATIC: *а* – надув формовочной смеси; *б* – двухстороннее прессование формы; *в* – сборка форм при транспортировке; *г* – заливка металла и вытягивание пресс-плиты; 1 – пресс-плита; 2 – камера; 3 – модельная плита поворотная; 4 – полуформы

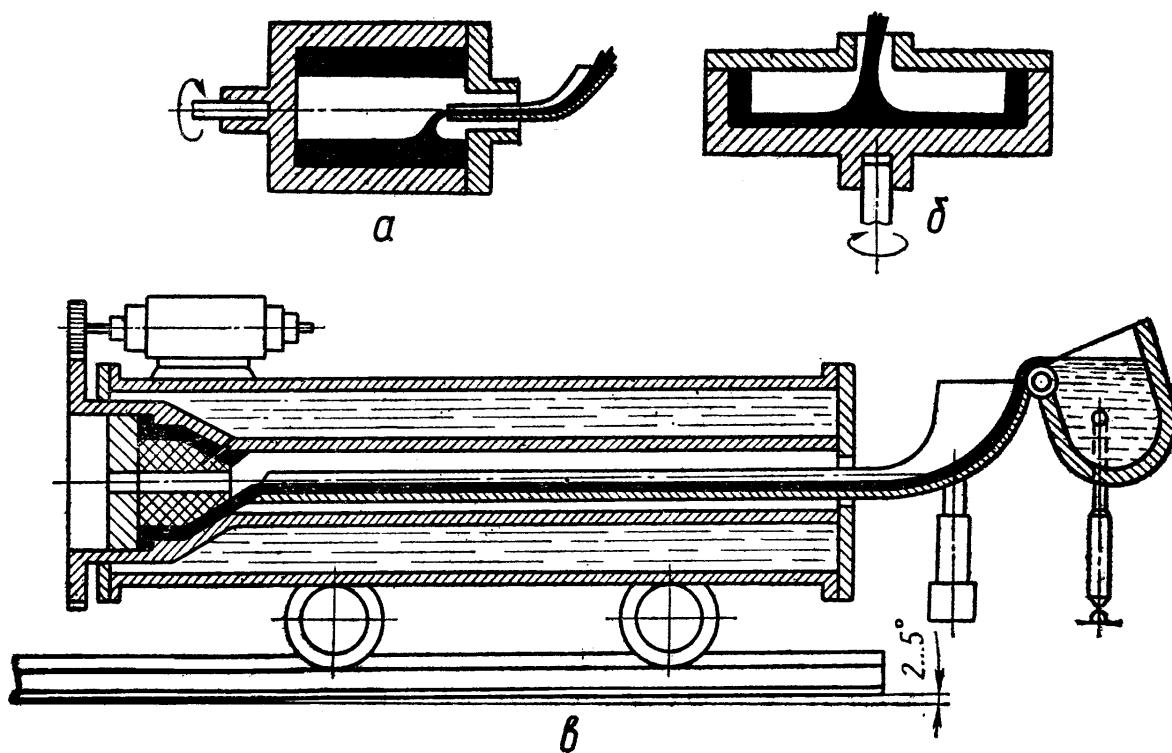


Рис. 10.6. Способы центробежного литья: *а* – формы с горизонтальной осью вращения; *б* – формы с вертикальной осью вращения; *в* – машина для отливки длинных труб

## Специальные способы литья

При центробежном способе литья заполнение формы расплавом и кристаллизация отливки происходят в поле действия центробежных сил.

Вращающиеся формы имеют горизонтальную (рис. 10.6, а) или вертикальную (рис. 10.6, б) оси вращения. Формирование отливок происходит при частоте вращения формы (200–1400) мин<sup>-1</sup>. Длинные гильзы и трубы изготавливают на специальных машинах (рис. 10.6, в), где заливка металла производится по перемещающемуся вдоль формы желобу.

Отливки получают и путем свободной заливки жидкого металла в постоянные разъемные металлические формы (*кокили*). Для получения сложных полостей в кокили вставляют разъемные (или неразъемные) металлические или песчаные стержни.

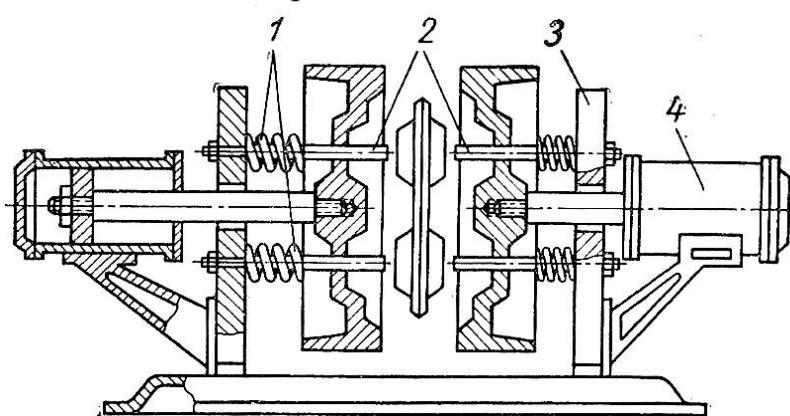


Рис. 10.7. Кокильный станок с пневматическим приводом

К достоинствам кокильного метода по сравнению с литьем в разовые песчаные формы можно отнести: повышение производительности труда (нет операции изготовления формы, так как форма постоянна); повышение качества отливок; высокую чистоту поверхности отливок; повышенную точность размеров; уменьшение припуска на обработку резанием. На рис. 10.7 представлена конструкция кокиля с замыканием полуформ пневмоцилиндрами 4. Для выталкивания отливок служат толкатели 2, закрепленные в плитах 3. Пружины 1 устанавливаются для амортизации.

Высокая производительность, точность размеров и качество поверхности, малые припуски на обработку резанием, низкая трудоемкость и полная автоматизация процесса отливки изделий достигаются при заливке металла в металлические формы на машинах *литья под давлением*. Заливка металла в пресс-форму и формирование отливки происходит под избыточным давлением в 30–100 МПа, поэтому плотность отливок достаточно высока.

Порция металла из трубы плунжером через литник подается в полости пресс-формы, состоящей из двух полуформ, закрепленных на подвижной и неподвижной плитах. Через плиты по каналам непрерывно прокачивается

вода. Внутреннюю полость в отливке при ее наличии получают стержнем. После затвердевания отливки пресс-форма раскрывается, но при отходе подвижной полуформы отливка удерживается в неподвижной части плунжером через прибыль. Затем системой выталкивания отливка снимается со знаков. Перед заливкой пресс-форму нагревают до 120–320 °С.

В массовом и крупносерийном производстве детали автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин массой от 0,25 до 100 кг отливают в *оболочковые формы*, которые склеиваются из полуформ.

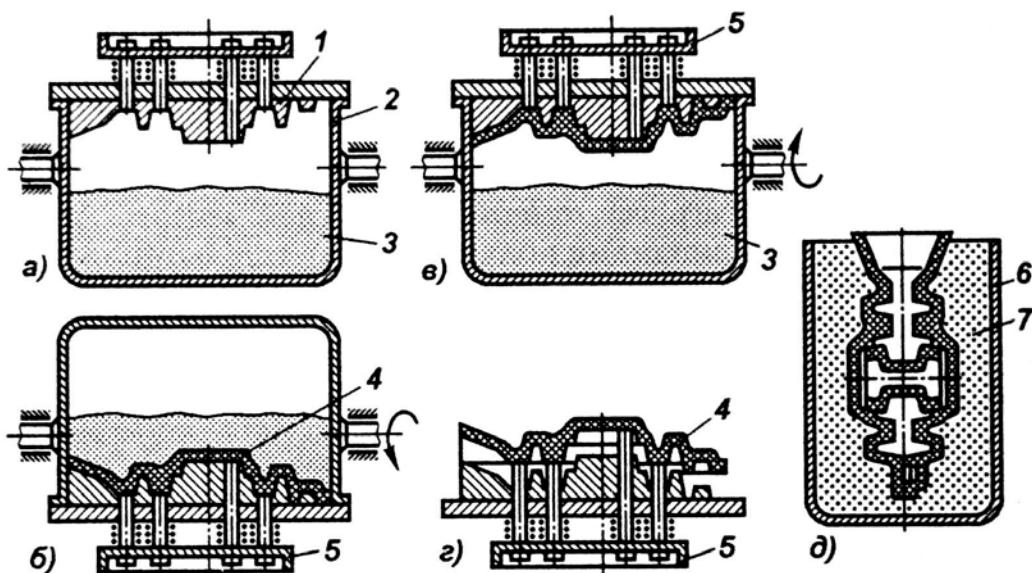


Рис. 10.8. Последовательность процесса формирования оболочковых форм

Процесс изготовления полуформ (рис. 10.8): подогрев модели и модельной плиты 1 до 200–250 °С; опрыскивание модели и модельной плиты разделительным составом (силиконовая жидкость); обсыпание модели формовочной смесью 3 при опрокидывании бункера 2. От теплоты модельной плиты термореактивная смола (пульвербакелит) в пограничном слое переходит в жидкое состояние, склеивает мелкозернистый кварцевый песок с образованием песчано-смоляной оболочки 4 толщиной 5–20 мм (в зависимости от времени выдержки); возврат бункера в исходное положение; модельная плита с полутвердой оболочкой 4 помещается в печь с температурой 300–350 °С. Через 50–90 с термореактивная смола переходит в твердое необратимое состояние; твердая оболочка снимается с модели специальными толкателями 5. Аналогично изготавливают и вторую полуформу. Готовые оболочковые полуформы склеивают быстротвердеющим kleem на специальных прессах, предварительно установив в них литейные стержни. Сборка устанавливается в контейнер 6 и засыпается опорным наполнителем 7 (кварцевый песок или металлическая дробь) с целью предохранения оболочки от разрушения в момент заливки металла.

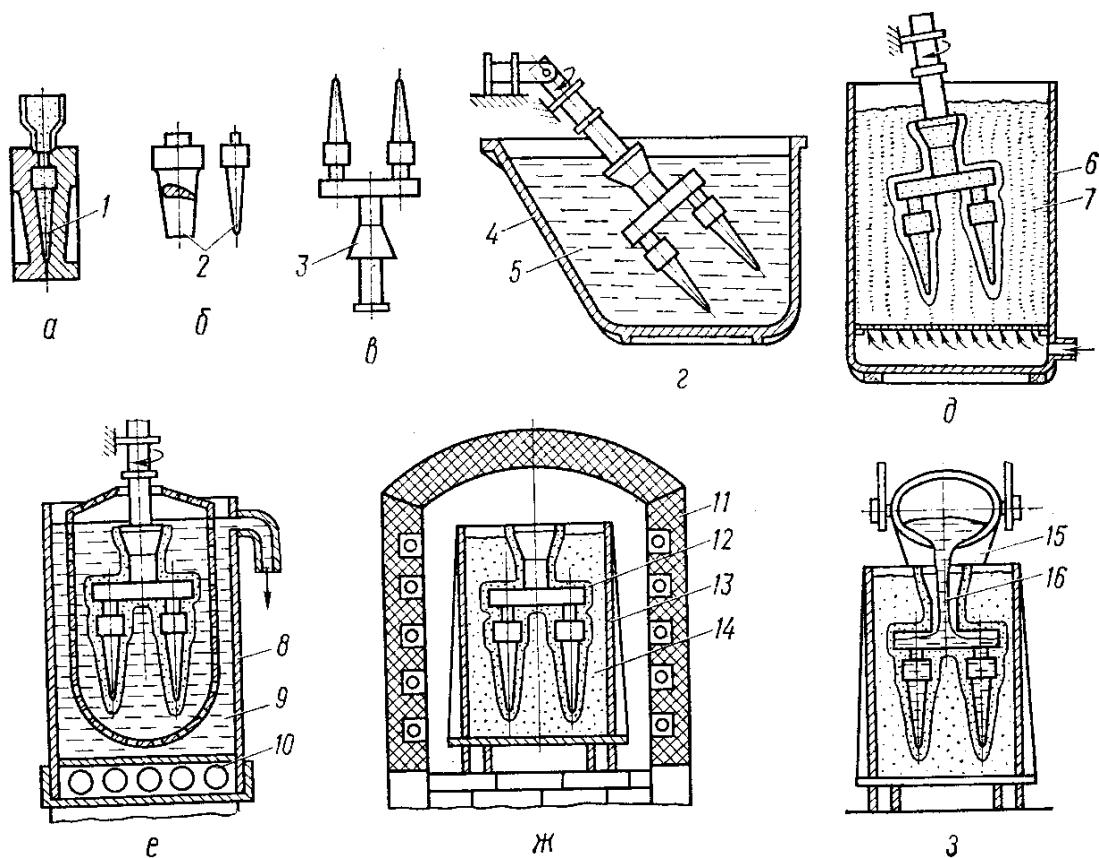


Рис. 10.9. Последовательность операций процесса литья по выплавляемым моделям: *а* – отливка выплавляемой неразъемной модели ; *б* – модель ; *в* – соединение моделей с литниковой системой ; *г, д* – нанесение слоя керамики ; *е* – выплавление модели ; *ж* – прокаливание формы ; *з* – заливка металла в форму

Мелкие (от нескольких граммов до нескольких десятков килограммов) сложные отливки из сплавов, которые трудно обрабатываются резанием, отливаются по *выплавляемым моделям*. Модели одноразового применения 2 отливаются в основном из парафиностеариновых смесей в форме 1. Затем они присоединяются к стойку 3 блоками (рис. 10.9, *а*). По ним окуранием в сметанообразную суспензию, состоящую из мелкозернистого песка-маршалита и связующего раствора (этилсиликат или жидкое стекло) с последующей обсыпкой крупнозернистым песком, изготавливается неразъемная керамическая оболочковая форма. После удаления модели выплавлением форма прокаливается при высоких температурах и в нее заливается жидкий металл. Основные операции технологического процесса изготовления отливок представлены на рис. 10.9.

Отливки сложной формы с внутренними полостями (коллектора двигателей, блоки и головки цилиндров и др.) часто изготавливают по газифицируемым моделям, которые после изготовления литейной формы не извлекаются из нее. Заливаемый металл в процессе заливки выжигает модель

и формирует отливку (рис. 10.10). Части моделей и литниковой системы изготавливают из супензионного полистирола, склеиваются между собой и окрашиваются. Формовка литьевой формы производится в сухом песке без связующих.

### Разработка чертежа отливки

Разработка чертежа отливки производится по чертежу готовой детали с учетом следующих положений:

- расположение поверхности разъема должно обеспечивать упрощение формовки и облегчение извлечения частей модели после уплотнения формовочной смеси;

- наиболее ответственная часть отливки должна располагаться внизу, так как в верхней части отливки сосредотачиваются естественные литейные дефекты – газовые пузыри, шлак, отпавшие частички формы;

- размеры разъемной модели должны быть больше размеров отливки на величину усадки заливаемого металла (например 1%);

- разъем модели и формы обозначают линией удвоенной толщины с указанием буквенного обозначения разъема – «М, Ф»;

- положение отливки в форме (верх – низ) при заливке обозначается стрелками и буквами В, Н;

- на обрабатываемые поверхности детали назначаются припуски на механическую обработку, величины которых зависят от типа сплава, класса точности размеров, сложности конфигурации и размера отливки, ряда припуска, типа производства (табл. 10.1).

На рис. 10.11, а представлен чертеж отливаемого из чугуна подшипника. При разработке процесса формовки можно принять как горизонтальное (рис. 10.11, б), так и вертикальное положение отливки в форме (рис. 10.11, в). Модели легко извлекаются из смеси.

На рис. 10.12 представлены варианты горизонтального (рис. 10.12, б) и вертикального расположения отливки (рис. 10.12, в). При горизонтальном расположении проблем с формовкой не возникает, так как «половинки» модели легко вынимаются из формовочной смеси.

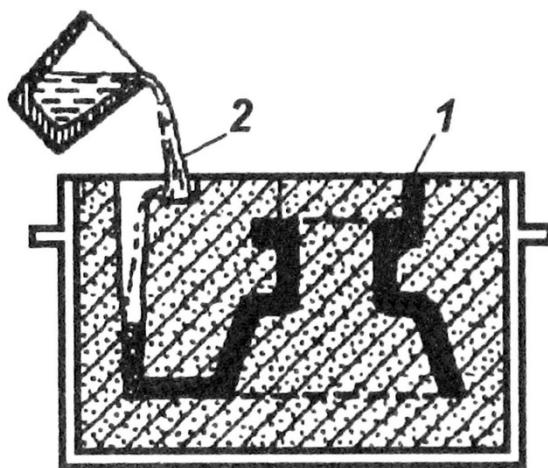


Рис. 10.10. Литье по газифицируемым моделям: 1 – полистироловая модель; 2 – расплав

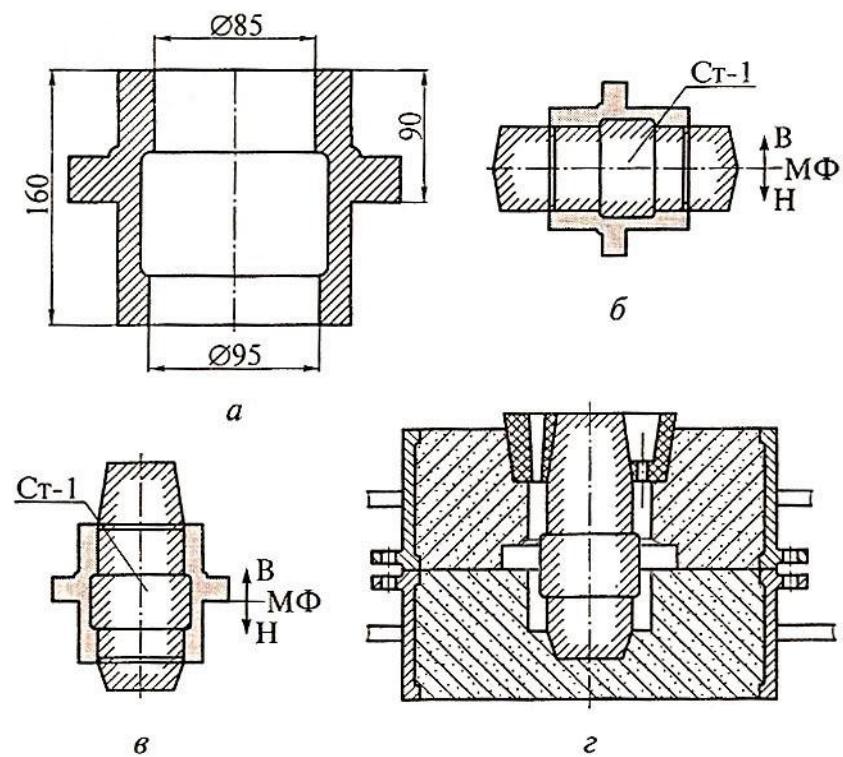


Рис. 10.11. Разработка технологического процесса изготовления отливки корпуса подшипника: *а* – чертеж детали; *б*, *в* – варианты технологии; *г* – собранная форма с заливкой формы через литниковую чашу

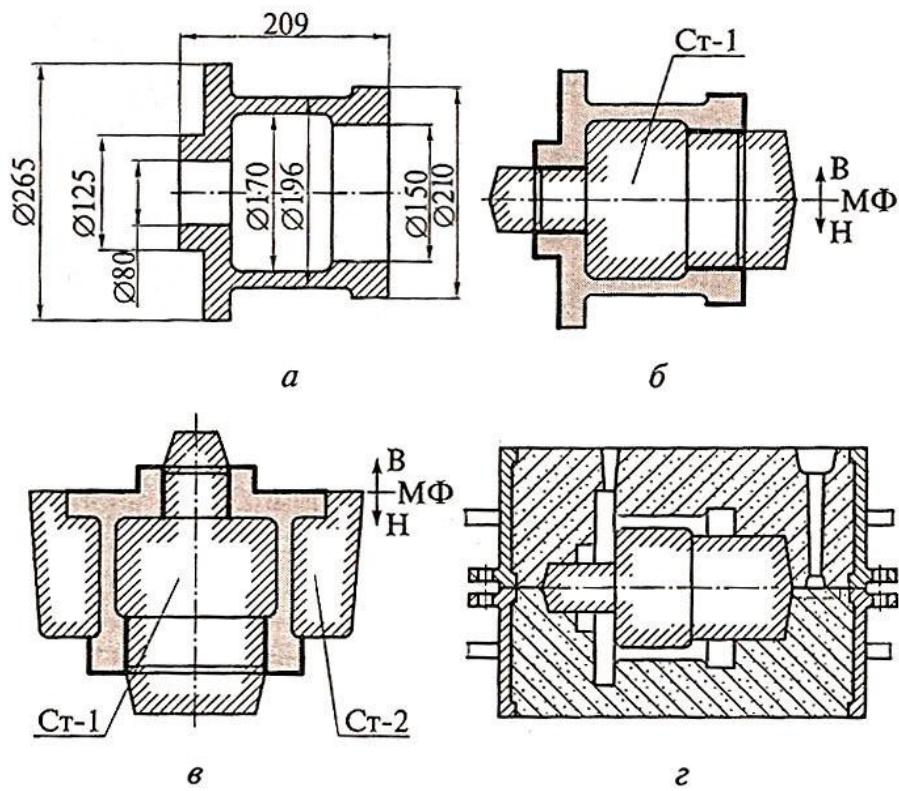


Рис. 10.12. Разработка технологического процесса изготовления отливки корпуса гидромотора: *а* – чертеж детали; *б*, *в* – варианты положения при формовке; *г* – собранная форма

При расположении детали в форме вертикально и выборе разъема на любом уровне невозможно произвести формовку обычным способом. Формовку можно выполнить только с использованием наружного разъемного стержня (Ст 2), что увеличивает трудоемкость подготовки элементов формы. Поэтому более экономичным оказывается получение отливки при горизонтальном разъеме модели (рис. 10.12, *г*).

Аналогичные трудности существуют при получении полуформ для отливки деталей с фасонным фланцем (рис. 10.13, *а*). Дело в том, что при назначении любой плоскости разъема модели невозможно извлечь одну из частей без нарушения сплошности полуформы. В этом случае приходится под фланец вводить стержень или «болван», который не позволяет смеси зайти под фланец со стороны подмодельной плиты. После формовки нижней части формы указанные дополнения удаляются (рис. 10.13, *б*) и производится формовка верхней полуформы.

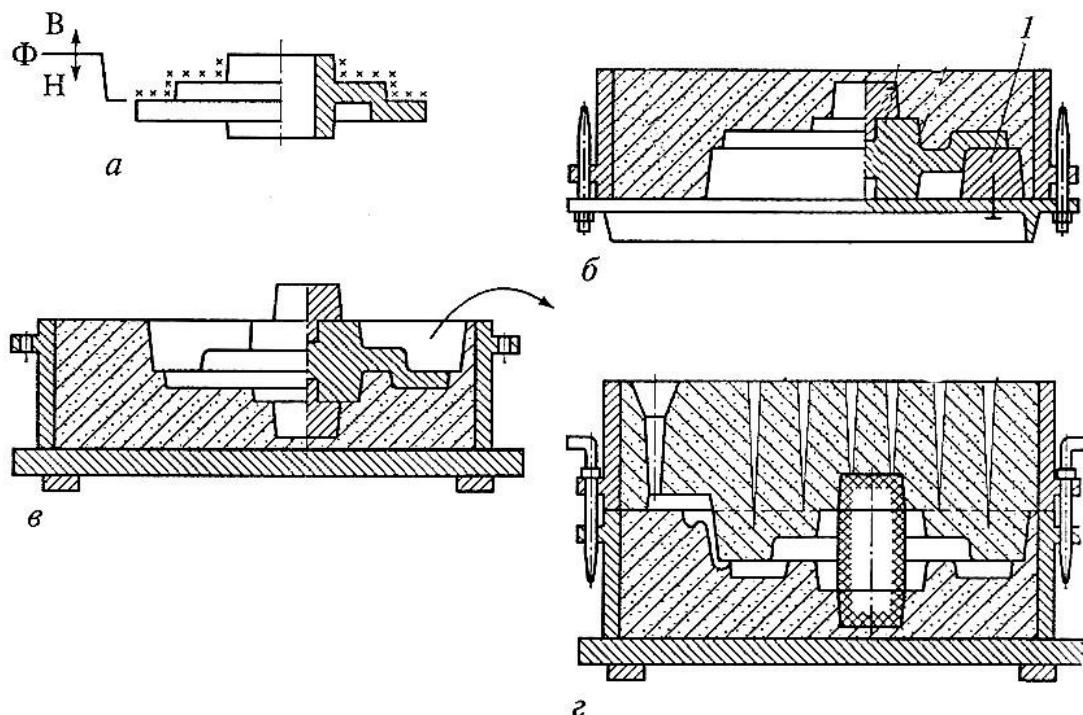


Рис. 10.13. Формовка оснастки для отливки детали с развитым фасонным фланцем:  
*а* – деталь; *б* – формовка со стороны выемки (1 – «болван»); *в* – удаление «болвана»; *г* – формовка верхней полуформы и установка стержня

Определение размеров припусков (табл. 10.3) на механическую обработку начинают с определения допусков размеров отливок (см. табл. 10.1).

*Наибольшая величина припуска по данным конкретного допуска назначается только на верхнюю поверхность (вершину) отливки*, т.к. в ней могут скапливаться литейные дефекты – газовые пузыри, шлак, отпавшие частицы формы, усадочные погрешности поверхности. Классы точности размеров и ряды припусков на механическую обработку назначают по табл. 10.2.

Полученная по табл. 10.1 величина допуска  $\Delta$  проставляется на соответствующий размер отливки (заготовки)  $\pm \Delta/2$  (рис. 10.14).

Таблица 10.1

**Допуски размеров отливок, мм**

Интервал номинальных размеров, мм	Классы точности размеров							
	1	2	3т	3	4	5т	5	6
До 4	0,06	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20	0,24	0,32
Св. 4 - 6	0,07	0,09	0,11	0,14	0,18	0,22	0,28	0,36
» 6 - 10	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20	0,24	0,32	0,40
» 10- 16	0,09	0,11	0,14	0,18	0,22	0,28	0,36	0,44
» 16 - 25	0,10	0,12	0,16	0,20	0,24	0,32	0,40	0,50
» 25 - 40	0,11	0,14	0,18	0,22	0,28	0,36	0,44	0,56
» 40 - 63	0,12	0,16	0,20	0,24	0,32	0,40	0,50	0,64
» 63 - 100	0,14	0,18	0,22	0,28	0,36	0,44	0,56	0,70
» 100 - 160	0,16	0,20	0,24	0,32	0,40	0,50	0,64	0,80
» 160 - 250	-	-	0,28	0,36	0,44	0,56	0,70	0,90
» 250 - 400	-	-	0,32	0,40	0,50	0,64	0,80	1,00

Интервал номинальных размеров, мм	Классы точности размеров													
	7т	7	8	9т	9	10	11т	11	12	13т	13	14	15	16
До 4	0,40	0,50	0,64	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	-	-	-	-	-	-
Св. 4 - 6	0,44	0,56	0,70	0,9	1,1	1,4	1,8	2,2	2,8	-	-	-	-	-
» 6 - 10	0,50	0,64	0,80	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	3,2	4,0	5,0	-	-	-
» 10 - 16	0,56	0,70	0,90	1,1	1,4	1,8	2,2	2,8	3,6	4,4	5,6	7	-	-
» 16 - 25	0,64	0,80	1,00	1,2	1,6	2,0	2,4	3,2	4,0	5,0	6,4	8	10	12
» 25 - 40	0,70	0,90	1,10	1,4	1,8	2,2	2,8	3,6	4,4	5,6	7,0	9	11	14
» 40 - 63	0,80	1,00	1,20	1,6	2,0	2,4	3,2	4,0	5,0	6,4	8,0	10	12	16
» 63 - 100	0,90	1,10	1,40	1/8	2,2	2,8	3,6	4,4	5,6	7,0	9,0	11	14	18
» 100 - 160	1,00	1,20	1,60	2,0	2,4	3,2	4,0	5,0	6,4	8,0	10,0	12	16	20
» 160 - 250	1,10	1,40	1,80	2,2	2,8	3,6	4,4	5,6	7,0	9,0	11,0	14	18	22
» 250 - 400	1,20	1,60	2,00	2,4	3,2	4,0	5,0	6,4	8,0	10,0	12,0	16	20	24

В углах стенок отливки предусматривается литейный радиус. Слишком малый литейный радиус приводит к подрыву формы (стержня), отбелу кромок и появлению холодных трещин в чугунных отливках. Величина литейного радиуса выбирается в зависимости от толщины стенки отливки. Толщина стенки  $h$  определяется из чертежа детали как наименьшая из сторон, формирующих угол отливки (рис. 10.15). Если  $h_2$  меньше  $h_1$ , то для определения литейного радиуса  $R$  по табл. 10.4 следует принять  $h=h_2$ .

В реальных отливках на литейный радиус кроме толщины стенки влияют склонность к подрыву и трещинам песчано-глинистых форм и стержней при их выеме и склонность к образованию отбела и холодных трещин в чугунных отливках. Эти факторы оцениваются тремя классами,

которые названы «классами дефектности»: 1-й, 2-й и 3-й классы дефектности отливок характеризуют соответственно низкую, среднюю и высокую склонность отливок к названным дефектам.

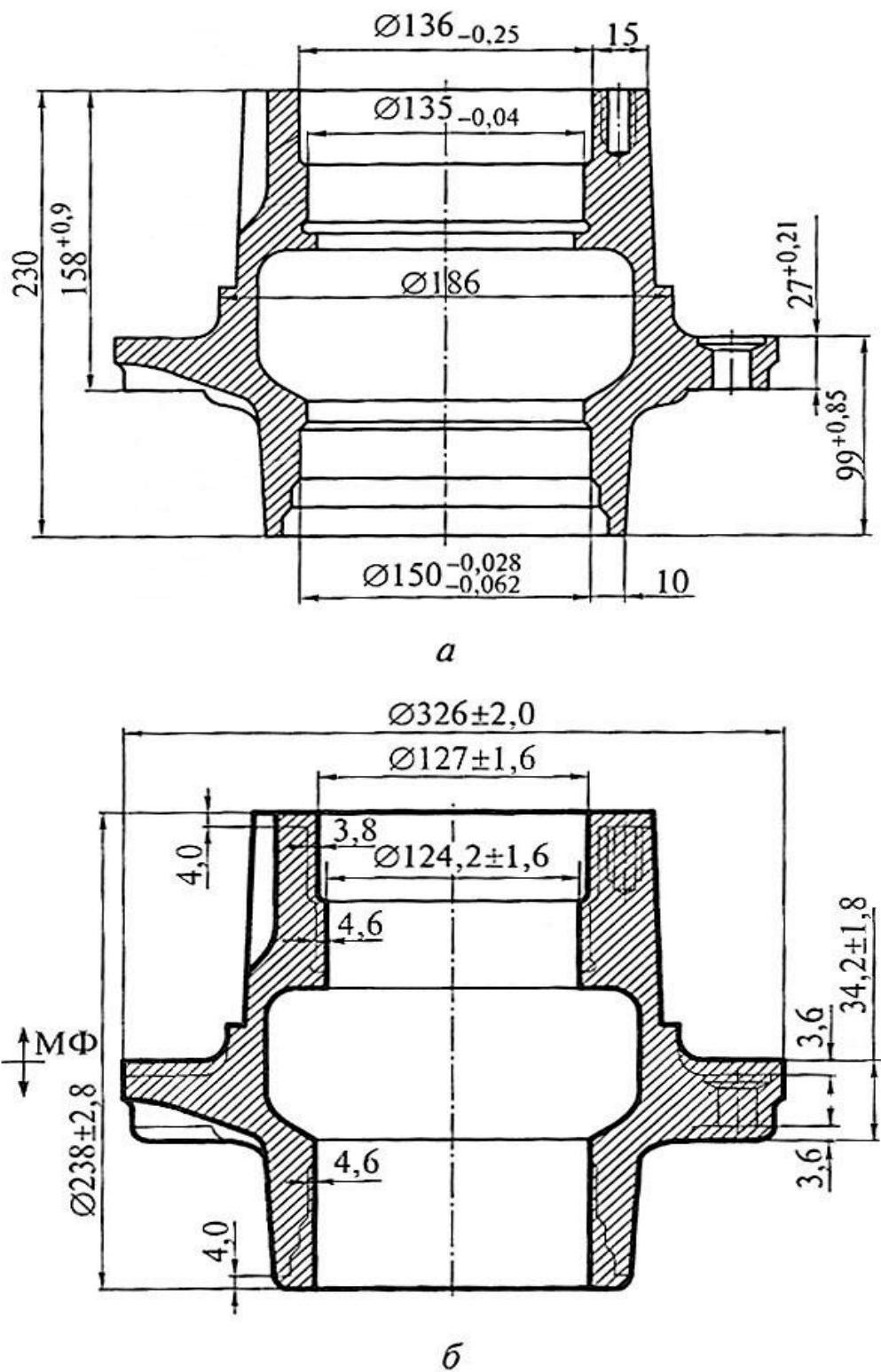


Рис. 10.14. Чертеж детали (a) и чертеж отливки (б). Тонкими линиями на чертеже отливки нанесены контуры детали

Таблица 10.2

**Классы точности размеров и ряды припусков на механическую обработку отливок**

Способ литья	Наибольший габаритный размер отливки, мм	Тип металла и сплава		
		цветные с температурой плавления ниже 700 °C	цветные с температурой плавления выше 700 °C, серый чугун	ковкий, высокопрочный и легирован-ный чугун, сталь
Литье под давлением в металлические формы	До 100	$\frac{3T-5}{1}$	$\frac{3-6}{1}$	$\frac{4-7T}{1}$
	Св. 100	$\frac{3-6}{1}$	$\frac{4-7T}{1}$	$\frac{5T-7}{1}$
Литье в керамические формы и по выплавляемым и выжигаемым моделям	До 100	$\frac{3-6}{1}$	$\frac{4-7T}{1-2}$	$\frac{5T-7}{I-2}$
	Св. 100	$\frac{4-7}{1-2}$	$\frac{5T-7}{1-2}$	$\frac{5-8}{1-2}$
Литье в кокиль и под низким давлением в металлические формы без и с песчаными стержнями, литье в песчаные формы, отверждаемые в контакте с оснасткой	До 100	$\frac{4-9}{1-2}$	$\frac{5T-10}{1-3}$	$\frac{5-11T}{I-3}$
	Св. 100	$\frac{5T-10}{1-3}$	$\frac{5-11T}{1-3}$	$\frac{6-11}{2-4}$
	До 630			
	Св. 630	$\frac{5-11T}{1-3}$	$\frac{6-11}{2-4}$	$\frac{7T-12}{2-5}$
Литье в песчаные формы, отверждаемые вне контакта с оснасткой, центробежное, в сырые и сухие песчано-глинистые формы	До 630	$\frac{6-11}{2-4}$	$\frac{7T-12}{2-4}$	$\frac{7-13T}{2-5}$
	Св. 630	$\frac{7-12}{2-4}$	$\frac{7-13T}{3-5}$	$\frac{9T-13}{3-6}$
	До 4000			
	Св. 4000	$\frac{8-13T}{3-5}$	$\frac{9T-13}{3-6}$	$\frac{9-14}{4-6}$

*Примечание.* В числителе указаны классы точности размеров, в знаменателе – ряды припусков. Меньшие их значения относятся к простым отливкам и условиям массового автоматизированного производства: большие значения – к сложным, мелкосерийно и индивидуально изготовленным отливкам; средние – к отливкам средней сложности и условиям механизированного серийного производства.

Таблица 10.3

**Припуски на механическую обработку**

Допуски размеров отливок, мм	Ряды припусков				
	2	3	4	5	
	Припуск на механическую обработку (в мм) не более				
1	2	3	4	5	
Св. 0,4 до 0,5	1,1/1,4	1,5/2,0	2,0/2,6	3,0/3,4	
-«- 0,5 -«-0,6	1,2/1,6	1,6/2,2	2,2/2,8	3,2/3,6	

### Окончание табл. 10.3

1	2	3	4	5
-<- 0,6 -<-0,8	1,3/1,8	1,8/2,4	2,4/3,0	3,4/3,8
-<- 0,8 -<-1,0	1,4/2,0	2,0/2,8	2,6/3,2	3,6/4,0
-<- 1,0 -<-1,2	1,6/2,4	2,2/3,0	2,8/3,4	3,8/4,2
-<- 1,2 -<-1,6	2,0/2,8	2,4/3,2	3,0/3,8	4,0/4,6
-<- 1,6 -<-2,0	2,4/3,2	2,8/3,6	3,4/4,2	4,2/5,0
-<- 2,0 -<-2,4	2,8/3,6	3,2/4,0	3,8/4,6	4,6/5,5
-<- 2,4 -<-3,0	3,2/4,0	3,6/4,5	3,8/4,6	4,6/5,5
-<- 3,0 -<-4,0	3,8/5,0	4,2/5,5	5,0/6,5	5,5/7,0
-<- 4,0 -<-5,0	4,4/6,0	5,0/6,5	5,5/7,5	6,0/8,0
-<- 5,0 -<-6,0	5,5/7,5	6,0/8,0	6,5/8,5	7,0/9,5
-<- 6,0 -<-8,0	6,5/9,5	7,0/10,0	7,5/11,0	8,5/12,0
-<-8,0 -<-10,0	-	9,0/12,0	10,0/13,0	11,0/14,0

Таблица 10.4

## **Определение литейного радиуса R**

Толщина стенки, h, мм	Литейный радиус R, мм, для классов склонности отливок к дефектам		
	1	2	3
До 5	1	2	3
-<< 5 -<< 10	2	3	4
-<< 10 -<< 30	2	3	4
-<< 30 -<< 40	3	4	5
-<< 40 -<< 50	3	4	5
-<< 50 -<< 60	4	5	6
-<< 60	5	6	7

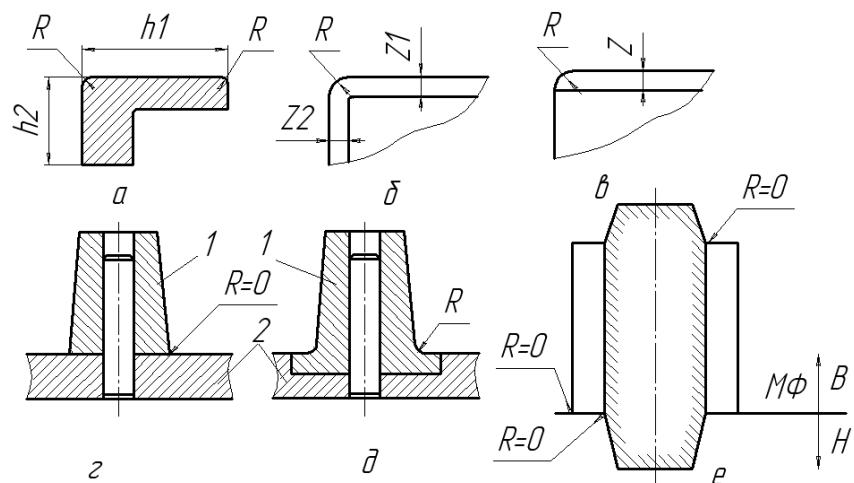


Рис. 10.15. Литейный радиус  $R$  на необрабатываемых поверхностях (а), на обрабатываемых поверхностях (б, в), на модельной оснастке (г, д), на углах, образуемых стержнем и плоскостью разъема (е):  
 1 – элемент литниковой системы; 2 – модельная плита; МФ – разъем модели и формы;  $B, H$  – соответственно верх и низ формы;  
 $h_1, h_2$  – толщины стенок;  $Z, Z_1, Z_2$  – припуски

Понятие «литейный радиус» применимо не только к отливке, но и к элементам литниковой системы, поскольку его отсутствие ( $R = 0$ ) приводит к подрыву формы в элементах литниковой системы (рис. 10.15, *г*). На рис. 10.15, *д* изображен шлакоуловитель *1* с литейным радиусом и модельная плита *2*. Иногда для предотвращения подрыва используют врезку шлакоуловителей с тем, чтобы обеспечить литейный радиус, который должен составлять 2...3 мм.

Требования по литейному радиусу указываются на чертеже отливки надписью типа «*Неуказанные литейные радиусы R 3 мм*».

Литейный радиус ( $R = 0$ ) отсутствует в плоскости разъема и на пересечении формы и стержня (рис. 10.15, *е*), так как в этих местах, как правило, образуются заливы, которые впоследствии зачищаются.

Для обеспечения извлечения модели из формы, стержня из стержневого ящика и отливки из металлической формы на моделях, в стержневых ящиках и в металлических формах предусматриваются формовочные (литейные) уклоны.

В настоящее время при назначении формовочных уклонов используется ГОСТ 3212–92 «Комплекты модельные. Уклоны формовочные. Стержневые знаки. Допуски размеров».

Величина формовочного уклона зависит от высоты формообразующей поверхности: чем меньше высота, тем больше уклон. Для сырой формовки это связано с тем, что поверхностные слои формы более подвержены подрыву, чем глубинные.

На чертеже отливки в ТУ литейные уклоны указываются обязательной строкой, например, типа «*Неуказанные литейные уклоны – не более 2°*».

Согласно ГОСТ 3212–92 проводят конструирование знаков стержней. С помощью знаков стержень устанавливают в литейную форму и фиксируют в заданном положении. Знаки подразделяются на горизонтальные и вертикальные в зависимости от положения стержня в форме.

## Расчет литниковой системы

*Литниковой системой* называется система каналов, по которым металл заполняет форму. Наиболее распространенной литниковой системой для отливок из чугуна является система, состоящая из четырех элементов: литниковой воронки (чаши) *1*, стояка *2*, шлакоуловителя и питателя *4* (рис. 10.16). Используются и более сложные литниковые системы.

Площадь сечения питателей определяется по формуле

$$F_{num} = m / \mu \cdot \tau \cdot \rho \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{cp}},$$

где  $F_{num}$  – суммарная площадь питателей,  $\text{м}^2$ ;  $m$  – масса отливки с литниками (масса литников составляет 40–60% от массы отливки), кг;  $\mu$  – общий коэффициент расхода в литниковой системе (табл. 10.5 и 10.6);  $\tau$  – опти-

мальная продолжительность заливки, с;  $\rho$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $H_{cp}$  – средний расчетный напор, м.

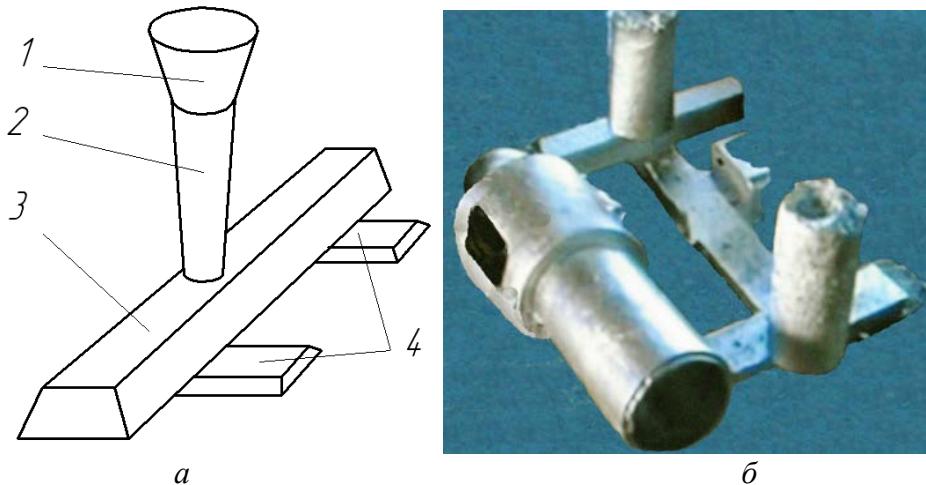


Рис. 10.16. Литниковая система: *а* – состав из четырех элементов: 1 – литниковая воронка; 2 – стояк; 3 – шлакоуловитель; 4 – питатели; *б* – система при отливке наконечника столба

Таблица 10.5

#### Значение коэффициента $\mu$ для чугунных отливок

Вид формы	Сопротивление формы		
	большое	среднее	малое
Сырая	0,35	0,42	0,50
Сухая	0,41	0,43	0,60

Таблица 10.6

#### Значение коэффициента $\mu$ для стальных отливок

Вид формы	Сопротивление формы		
	большое	среднее	малое
Сырая	0,25	0,32	0,42
Сухая	0,30	0,38	0,50

Средний расчетный напор определяется по формуле

$$H_{cp} = H_{cm} - h_e^2 / (2 \cdot h_0),$$

где  $H_{cm}$  – высота стояка, равная высоте верхней опоки, м (рис. 10.17);  $h_e$  – расстояние от верхней кромки питателя до наиболее высокой точки отливки, м;  $h_0$  – общая высота отливки по расположению в форме, м.

Продолжительность заливки форм для серого чугуна

$$\tau = S\sqrt{m},$$

где  $m$  – масса отливки с литниками, кг;  $S$  – коэффициент, учитывающий толщину стенки отливки, определяемый по табл. 10.7.

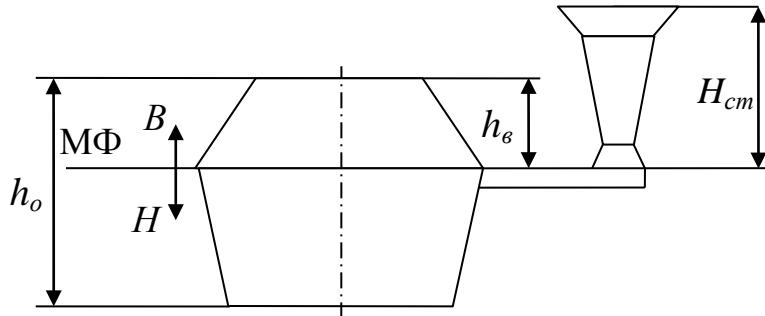


Рис. 10.17. Схема для расчета литниковой системы

Продолжительность заливки форм для стального литья

$$\tau = S_1 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\delta \cdot m},$$

где  $m$  – масса отливки с литниками, кг;  $S_1$  – коэффициент, учитывающий способ подвода металла и его жидкотекучесть (табл. 10.8).

Таблица 10.7

**Значение коэффициента  $S$**

Толщина стенки, мм		
2,5–3,5	3,5–8	8–15 и более
1,6	1,85	2,2

Таблица 10.8

**Значение коэффициента  $S_1$**

Температура металла и жидкотекучесть	Подвод металла		
	снизу сифоном или в толстостенную часть отливки	на половине высоты или ступенчатый	сверху или равномерный подвод в тонкостенные части
Нормальная	1,3	1,4	1,5–1,6
Повышенная	1,4–1,5	1,4–1,6	1,6–1,8

Площади сечений шлакоуловителя  $F_{шл}$  и стояка  $F_{cm}$  определяются по соотношениям:

- для чугунного литья  $F_{num}:F_{шл}:F_{cm} = 1:1,1:1,15$ ;
- для стального литья  $F_{num}:F_{шл}:F_{cm} = 1:1,2:1,4$ .

Чертеж отливки и элементы литниковой системы оформляются по ГОСТ 3.1125–88.

## **Порядок выполнения работы**

1. Изучить технологические особенности некоторых способов отливки машиностроительных деталей.
2. Изучить технологические особенности отливки деталей в песчано-глинистые формы, а также последовательность разработки чертежа отливки и формы.
3. На чертеже детали, выданном преподавателем, показать плоскость разъема модели и формы с указанием их верха и низа; определить лучший вариант положения детали в форме.
4. Определить величины допусков и припусков на механическую обработку и указать их на чертеже детали.
5. Определить конфигурацию стержней и стержневых знаков и указать их на чертеже модели.
6. Определить и указать на чертеже детали формовочные уклоны.
7. Определить размеры элементов литниково-питающей системы:
  - площадь сечения питателей;
  - площадь сечения шлакоуловителя;
  - площадь сечения стояка.
8. В лаборатории кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» изучить на практике изготовление песчано-глинистой формы.
9. В лаборатории кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» изучить особенности отливки деталей в разъемные металлические формы.

## **Контрольные вопросы и задания**

1. Каковы особенности конструирования отливок при получении их в песчано-глинистых формах?
2. Каков порядок определения припусков на механическую обработку отливок?
3. От чего зависят формовочные уклоны?
4. Как определяются радиусы скруглений?
5. Чем оформляются внутренние полости в отливках?
6. Изложите методику расчета элементов литниково-питающей системы.
7. Опишите технологический процесс изготовления формы по разъемным моделям.
8. Опишите назначение элементов литниково-питающей системы.
9. Опишите последовательность формовки по разъемной модели.
10. Опишите особенности конструкции моделей при литье отливок с полостями.

11. Опишите особенности конструкции форм при получении отливок с ребрами, расположенными в разных полостях.
12. Сформулируйте назначение прибылей и места их расположения.
13. Опишите особенности центробежного литья.
14. Опишите преимущества и недостатки литья в кокили.
15. Опишите преимущества и недостатки литья в песчано-глинистые формы.

### **Библиографический список**

1. Материаловедение : учебное пособие / Д. А. Болдырев, С. В. Давыдов, Л. И. Попова, М. Н. Тюрьков. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 424 с. – ISBN 978-5-9729-0417-4 . // Лань : электронно-библиотечная система : [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/148345> (дата обращения: 19.12.2020).
2. Земсков, Ю. П. Материаловедение : учебное пособие / Ю. П. Земсков. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 188 с. – ISBN 978-5-8114-3392-6 . // Лань : электронно-библиотечная система : [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/113910> (дата обращения: 19.12.2020).
3. Бурый, Г. Г. Материаловедение. Технология конструкционных материалов : учебно-методическое пособие / Г. Г. Бурый. – Омск : СибАДИ, 2019. – 222 с. – ISBN 978-5-00113-057-4 . // Лань : электронно-библиотечная система : [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/149463> (дата обращения: 19.12.2020).
4. Артамонов, Е. И. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебное пособие / Е. И. Артамонов, М. С. Приказчиков, В. В. Шигаева. – Самара : СамГАУ, 2018. – 248 с. – ISBN 978-5-88575-524-5 . // Лань : электронно-библиотечная система : [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/113421> (дата обращения: 19.12.2020).
5. Технология конструкционных материалов : учебное пособие / Е. Е. Складнова, Г. А. Воробьёва, Ю. А. Петренко, В. А. Ленина. – Санкт-Петербург : БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2019. – 100 с. // Лань : электронно-библиотечная система : [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/157111> (дата обращения: 19.12.2020).