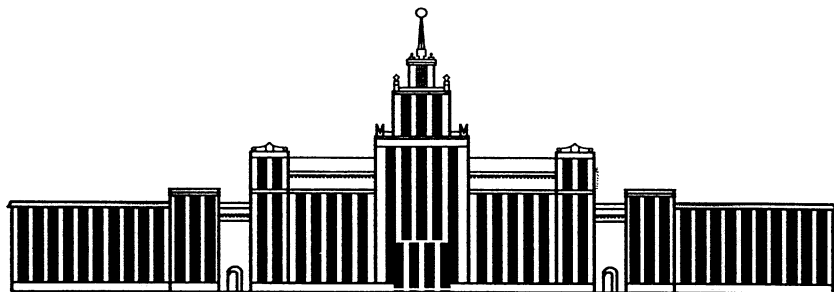


---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---



---

ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

620.22(07)  
Л241

И.В. Лапина, В.Л. Ильичев, А.С. Созыкина

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебное пособие к лабораторным работам

---

Челябинск  
2013

---

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра физическое металловедение и физика твердого тела

620.22(07)  
Л241

И.В. Лапина, В.Л. Ильичев, А.С. Созыкина

## **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Учебное пособие к лабораторным работам

Челябинск  
Издательский центр ЮУрГУ  
2013

УДК 620.22(075.8)  
Л241

*Одобрено  
учебно-методической комиссией  
физико-металлургического факультета*

*Рецензенты:  
Б.В. Курчатова, С.Е. Карзунов*

**Лапина, И.В.**

Л241 Материаловедение: учебное пособие к лабораторным работам / И.В. Лапина, В.Л. Ильичев, А.С. Созыкина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 82 с.

Учебное пособие является руководством к лабораторным работам по курсу «Материаловедение». В нем даны рекомендации к выполнению работ, приведены методические указания для их выполнения и вопросы для самоконтроля.

Пособие составлено в соответствии с ФГОС ВПО и предназначено для студентов машиностроительных, технологических специальностей дневной и заочной форм обучения, а также обучающихся по направлению «Металлургия».

УДК 620.22(075.8)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Материаловедение изучает зависимости между химическим составом, строением (структурой) и свойствами материалов и закономерности их изменения под влиянием тепловых, механических и других внешних воздействий. Для студентов машиностроительных специальностей это одна из базовых дисциплин, материал которой широко используется в специальных курсах, курсовом и дипломном проектировании, а также в практической профессиональной деятельности.

Курс материаловедения состоит из двух частей:

- металловедение и термическая обработка металлов и сплавов;
- неметаллические материалы.

В данном пособии рассмотрена методика проведения цикла лабораторных работ по первой части курса. В зависимости от специальности и количества часов кафедры в начале семестра планирует перечень лабораторных работ для каждого потока и составляет расписание. При этом несколько занятий выделяются для проведения семинарских занятий по наиболее трудным для усвоения или выносимым на самостоятельную проработку темам.

Для успешного выполнения лабораторной работы студент должен прийти на занятия подготовленным, т.е. проработать соответствующий раздел курса. Перед началом лабораторных работ преподаватель проводит собеседование по теоретическим вопросам, связанным с темой работы, описанием работы, порядком ее выполнения и знанием техники безопасности. По каждой работе он должен написать отчет и защитить его. Для самоконтроля в конце каждой лабораторной работы приведены вопросы, а в некоторых случаях, кроме них, и задания по совершенствованию практических навыков.

# **1. МАКРОСТРУКТУРНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

Для изучения строения металлов и сплавов применяются различные методы исследования. Наиболее простым и доступным является макро-структурный метод. Макроанализ широко используется на заводах при приемке–сдаче продукции, экспертизных работах при авариях и разрушениях. Необходимость проведения контроля макроструктуры, а также нормы по допустимым дефектам определяются стандартами на конкретный вид продукции.

Макроструктурой называют строение металла или сплава, видимое невооруженным глазом или при небольших увеличениях (до 40 раз) с помощью лупы. В этом случае можно наблюдать одновременно большую поверхность заготовки (детали) и получить представление об общем строении металла, о наличии в нем тех или иных пороков.

Макроскопический анализ может быть как окончательным (в случае явных дефектов), так и предварительным видом исследования.

*Макроанализ позволяет выявить:*

- характер разрушения изделия (по излому);
- строение металлического слитка (наличие в нем различных зон кристаллизации);
- нарушение сплошности металла (усадочную рыхлость, газовые пузыри, раковины, трещины, пороки сварки и т.д.);
- химическую неоднородность сплава (ликвацию);
- направление волокна в деформированном металле;
- неоднородность, созданную термической или химико-термической обработкой.

*Макроструктура может быть исследована:*

- на поверхности заготовки или детали;
- на изломе;
- на макрошлифе.

## **1.1. Цель работы**

Познакомиться с методикой проведения и возможностями макроструктурного метода исследования металлов и сплавов.

## **1.2. Материал исследования**

Коллекция изломов, макрошлифов, фотографии.

## **1.3. Порядок выполнения работы**

1. Изучить различные виды изломов, установить причины их возникновения, зарисовать наиболее характерные изломы;

2. Изучить на макрошлифах строение слитка, волокнистое строение горячедеформированного металла и т.д.;

3. Приготовить макрошлиф и выявить распределение серы по методу Баумана. Дать заключение о характере распределения серы.

#### 1.4. Содержание отчета

Отчет должен включать:

- 1) цель работы;
- 2) сущность макроанализа и основные его методы;
- 3) краткое описание и схематические рисунки изломов и макрошлифов;
- 4) методику приготовления макрошлифов;
- 5) методику определения распределения серы в стали по Бауману с заключением о характере распределения серы.

#### 1.5. Методические указания

Работа состоит из двух частей: изучения изломов и макрошлифов. Во второй части студенты готовят макрошлиф и делают серный отпечаток по методу Баумана.

##### 1.5.1. Изучение изломов

Изломом называют поверхность полностью разрушенного образца или детали при различных способах нагружения: растяжении, сжатии, изгибе, кручении. Изломы обычно классифицируют по двум признакам:

- по характеру нагружения, вызвавшему данный излом (статический, динамический, усталостный);
- по особенностям строения излома.

По особенностям строения излома можно, в частности установить каким было разрушение – вязким, хрупким, или усталостным. На изломах можно увидеть и некоторые дефекты металла (например, флокены).

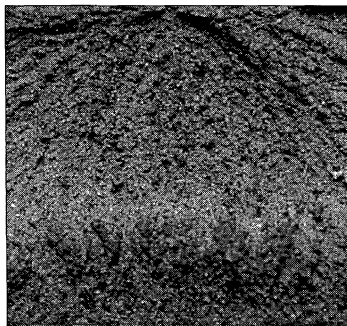


Рис.1.1. Волокнистый излом

*Вязкому разрушению* предшествует значительная пластическая деформация. При таком разрушении возникает *волокнистый излом* с матовой поверхностью (рис.1.1). В этом случае структура металла (форма, размер зерна) не обнаруживается, так как излому предшествует пластическая деформация, которая искажает действительное зерно. Стальные изделия, имеющие волокнистое строение излома, как правило, обладают высоким значением ударной вязкости.

*Хрупким* называют разрушение, которое протекает без видимой макропластической деформации. Хрупкое разру-

шение происходит при малых нагрузках, так как не затрачивается энергия на предварительную деформацию. Хрупкий излом может иметь *кристаллическое строение*. При кристаллическом (зернистом) изломе можно наблюдать так называемое зерно излома, которое дает представление о внутреннем строении металла – форме и величине зерна. Размеры зерен, видимые в изломе, могут колебаться в очень широких пределах: от нескольких сантиметров до тысячных долей миллиметра. Чем крупнее зерно, тем, как правило, ниже механические свойства и, в частности, ударная вязкость.

Кристаллический излом бывает двух типов: межкристаллический (или интеркристаллический) и транскристаллический.

Межкристаллический излом (рис. 1.2, а, в) проходит по границам зерен металла. Такой вид излома возможен, когда при определенных условиях охлаждения после литья или термической обработки по границам зерен выделяются хрупкие фазы или когда периферийные зоны зерен обогащаются элементами, повышающими хрупкость. При транскристаллитном изломе (рис. 1.2, б, г) разрушение происходит по зерну, прочность зерна оказывается меньше прочности границ.

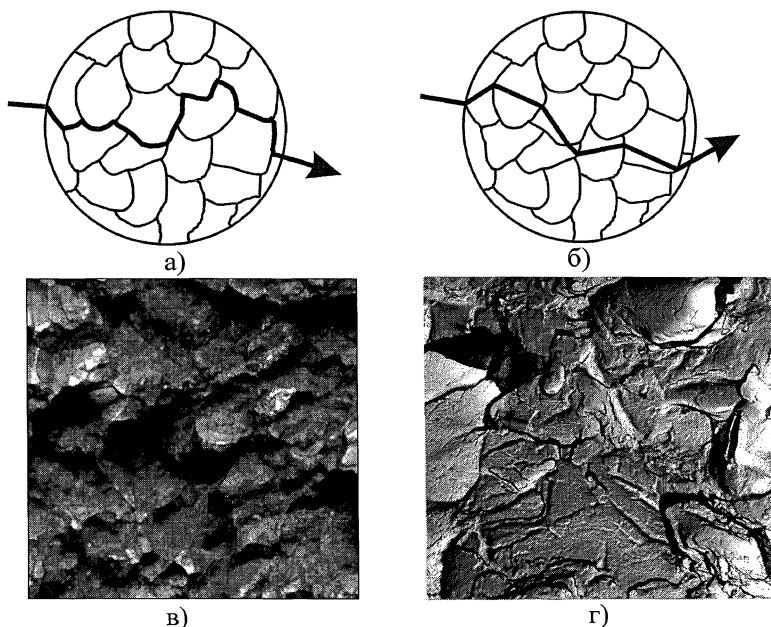


Рис.1.2. Схемы прохождения трещины при межзеренном (а) и транзеренном разрушении (б). Межзеренный излом (в) и транзеренный излом (г)

Один и тот же материал в одном и том же структурном состоянии может в зависимости от условий нагружения (температуры, скорости приложения нагрузки, характера напряженного состояния) обнаружить вязкое или хрупкое разрушение и, следовательно, волокнистый или кристаллический излом.

*Усталостное разрушение* характерно для деталей машин и механизмов (например, коленчатых валов, рельсов и т.д.), работающих при повторно-переменных или циклических напряжениях. Это разрушение особенно опасно, так как может происходить под действием напряжений, не превышающих предела текучести металла. Начальная микротрещина обычно зарождается на поверхности изделия в местах концентрации напряжений (у надрезов, на переходах от одного сечения к другому и т.п., нередко у металлургических и других дефектах). При повторном и неоднократном приложении и снятии нагрузки трещина длительное время развивается вглубь изделия. Поперечное сечение детали все больше ослабляется и, наконец, оказывается недостаточным для восприятия действующих нагрузок. Тогда наступает период окончательного разрушения, который протекает достаточно быстро и, как правило, хрупко. Поэтому *излом при усталостном разрушении* состоит из двух зон (рис. 1.3): зоны медленного развития трещины с гладкой (притертой) поверхностью с чередующимися концентрическими линиями вокруг очага разрушения и зоны долома – хрупкого кристаллического излома.

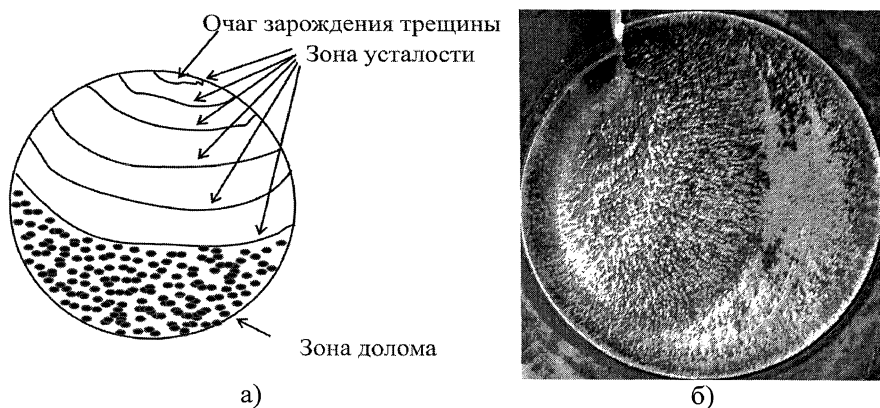


Рис.1.3. Схема зарождения и развития трещины при переменном изгибе круглого образца (а). Усталостный излом вала (б)

Излом позволяет обнаружить различные дефекты металла (пустоты, трещины, газовые пузыри и т.д.) и дефекты термообработки. Например,



если температура при термообработке была слишком высока, то возникает перегрев или пережог.

*Перегрев* приводит к укрупнению зерна. Этот дефект может быть устранен путем повторного нагрева до температуры, лежащей ниже температуры, при которой произошел перегрев. В результате зерно получается более мелким и механические свойства повышаются.

*Пережог* наблюдается при более высоких температурах нагрева (близких к температуре солидус), чем перегрев. Сопровождается сильным укрупнением зерна, окислением границ зерен или их оплавлением, что приводит к хрупкому межкристаллитному излому. Этот дефект считается неисправимым, и изделие идет в брак.

Примерами дефектных изломов перегретой стали являются так называемые нафталинистый (транскристаллитный излом с избирательным блеском) и камневидный (межкристаллитный излом ярко выраженного грубого характера) изломы.

Показательными являются изломы легированных сталей, в которых можно обнаружить специфические пороки – шиферный излом и флокены.

*Шиферным* (слоистым) называется излом стали, характеризующийся более или менее слоистым строением. Он подобен разрушению грубоволокнистого дерева в продольном направлении с обрывами групп волокон (рис.1.4).

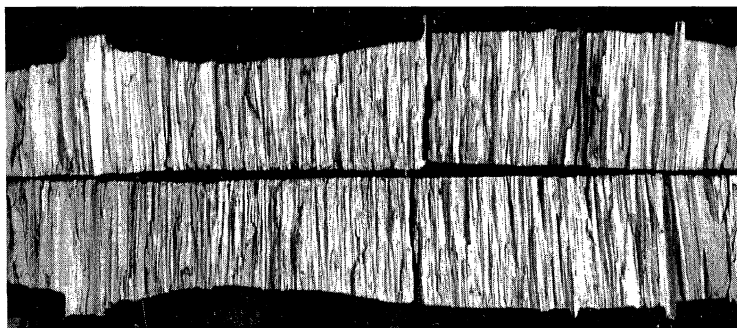
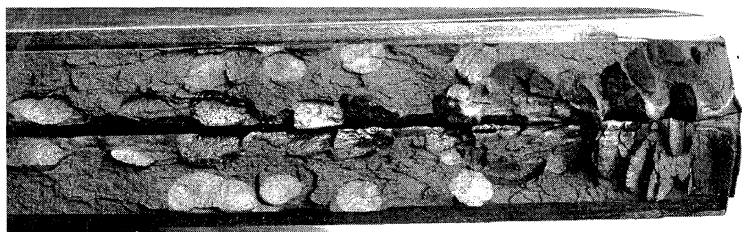


Рис. 1.4. Шиферный излом

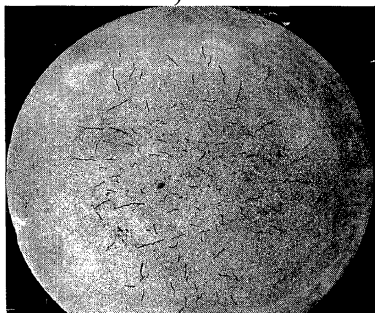
*Шиферный* излом наблюдается только у стали, подвергнутой горячей деформации. Причина образования шиферного излома – повышенное загрязнение стали неметаллическими включениями, пористость, наличие неоднородных по химическому составу и свойствам участков. В результате односторонней вытяжки при горячей обработке давлением (например, прокатке) разнородные составляющие удлиняются и создают расслоение стали. При развитии шиферности снижаются такие свойства как относи-

тельное сужение и ударная вязкость, определенные на поперечных образцах. Сталь, имеющая ярко выраженный шиферный излом считается некондиционной.

*Флокенами* называют внутренние трещины стали. В изломе они видны в виде серебристых пятен округлой или эллиптической формы с отчетливо выраженным кристаллическим строением (рис. 1.5, а). Флокены в поперечном сечении, например на травленных поперечных шлифах, выявляются как тонкие трещины (рис.1.5, б).



а)



б)

Рис.1.5. Флокены в изломе (а) и на макрошлифе (б)

Флокены, как правило, поражают внутренние зоны стальных поковок. Образование флокенов происходит в определенном интервале температур примерно  $230^{\circ}\text{C}$  и ниже при относительно быстром охлаждении стали после горячей пластической деформации. Образованию флокенов способствует растворенный в стали водород и наличие напряжений. С понижением температуры растворимость водорода в стали понижается. Если охлаждение происходило слишком быстро и поперечное сечение изделия велико, то времени для удаления водорода из стали путем диффузии недостаточно. Этот фактор в совокупности с наложением напряжений вызывает появление трещин в местах скопления водорода.

### 1.5.2. Изучение макрошлифов

Макрошлифом называют отшлифованную и протравленную поверхность металла. Для приготовления макрошлифа вырезается образец из интересующего участка изделия, одну поверхность которого затем шлифуют и подвергают травлению специальными реактивами. После травления на поверхности макрошлифа выявляется макроструктура.

На макрошлифе можно выявить *строение литой стали*. В процессе кристаллизации обычно образуются древовидные кристаллы, получившие название дендритов. После образования зародышей рост зерна происходит неравномерно. Максимальная скорость роста кристаллов наблюдается по таким плоскостям и направлениям, которые имеют наибольшую плотность упаковки атомов. В результате вырастают длинные ветви, так называемые оси первого порядка (рис. 1.6, а). Одновременно с удлинением осей первого порядка на их ребрах зарождаются и растут перпендикулярно к ним оси второго порядка, от которых ответвляются оси третьего порядка и т.д. Дендриты растут до соприкосновения друг с другом, постепенно заполняя все промежутки, занятые жидким металлом. Кристаллизация идет таким образом, что внутренние объемы дендритов, кристаллизующиеся в первую очередь, наиболее обогащены тугоплавкими элементами сплава, а периферийные зоны, кристаллизующиеся в последнюю очередь, – легкоплавкими. Химическую неоднородность внутри отдельного дендрита называют дендритной ликвацией. Она приводит к ухудшению механических свойств. Дендритное строение кристаллов является типичным для литого металла.

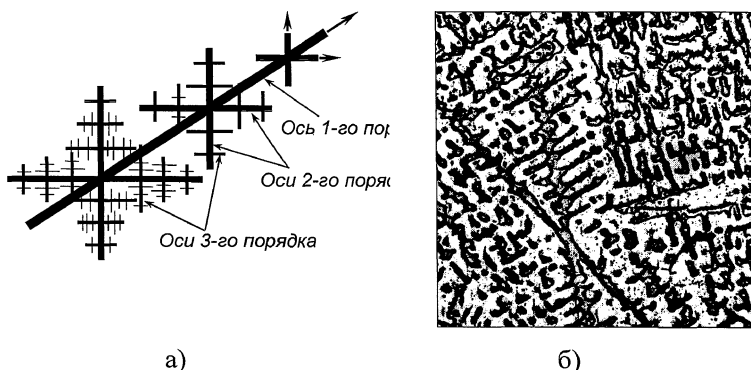


Рис.1.6. Схема строения дендрита (а), и вид дендритной структуры на шлифе (б)

Кристаллы (зерна) металла могут иметь равноосную (глобулярную) и столбчатую (вытянутую) форму. В общем случае в слитке сплавов можно наблюдать три зоны кристаллизации (рис.1.7). Кристаллизация жидкого

металла начинается у стенок изложницы. Так как стенки изложницы холодные, то жидкий металл в прилежащем к поверхности тонком слое оказывается сильно переохлажденным. Это приводит к образованию огромного числа центров кристаллизации и к формированию узкой зоны 1 мелких равноосных кристаллов. По мере удаления от стенок изложницы степень переохлаждения жидкого металла становится меньше, что вызывает уменьшение числа центров кристаллизации. Образующиеся кристаллы растут в направлении, противоположном отводу тепла, т.е. рост кристаллов имеет направленный характер. В результате возникает зона 2 крупных столбчатых кристаллов. В центральной части изложницы температура жидкого металла меняется медленно. Степень переохлаждения жидкого металла мала, вследствие этого возникает небольшое количество центров кристаллизации. Направленность отвода тепла теряется и образовавшиеся кристаллы растут во всех направлениях примерно с одинаковой скоростью. В центре слитка формируется зона 3, состоящая из крупных равноосных кристаллов.

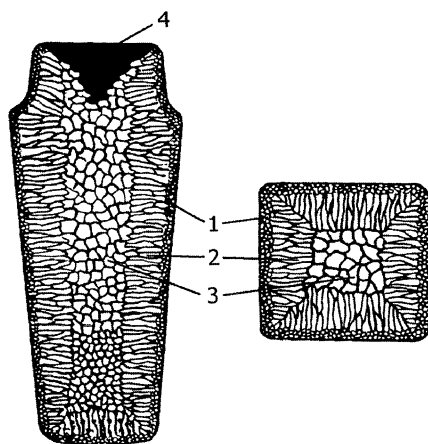


Рис. 1.7. Схема строения металлического слитка:

- 1 — зона мелких равноосных кристаллов; 2 — зона столбчатых кристаллов;  
3 — зона крупных равноосных кристаллов; 4 — усадочная раковина

Необходимо отметить, что протяженность, а также наличие указанных зон зависит от многих факторов. Изменяя температуру жидкого металла, форму, материал изложницы, ее толщину и т.д., можно в широком диапазоне регулировать форму и размер зерна.

При кристаллизации большинства металлов объем уменьшается, так как объем твердого металла обычно меньше, чем жидкого. Это явление называется усадкой. В той части слитка, которая затвердевает в

последнюю очередь, образуется полость – усадочная раковина. Очень часто это верхняя часть слитка. Она подлежит отрезке и переплавке.

В *горячедеформированном металле* на макрошлифах путем травления можно выявить *направление волокон*. Волокнистое строение возникает из-за того, что при горячей прокатке, ковке, штамповке и т.п., присутствующие в металле неметаллические включения вытягиваются вдоль направления деформации. Необходимость в определении расположения волокон вызвана тем, что прочность и пластичность, как правило, выше вдоль волокон, чем поперек. Выявление волокнистого строения позволяет сделать вывод о правильности проведения деформации. Волокна должны располагаться соответственно конфигурации изделия (рис. 1.8).

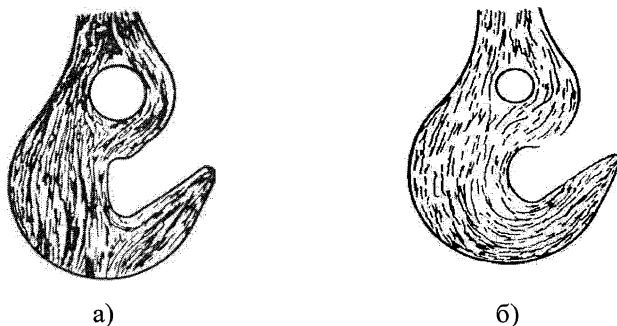


Рис. 1.8. Макростроение неправильно (а) и правильно (б) изготовленного крюка

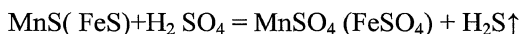
На макрошлифах путем специального травления изучают и *распределение в металле различных элементов*. С помощью макроанализа, в отличие от химического, нельзя определить количественное содержание примесей, но можно установить неоднородность распределения их в металле. Широкое применение в практике металлографических лабораторий получила серная проба по Бауману для выявления ликвации (химической неоднородности) серы. Сера относится к вредным примесям и ее количество в стали ограничивается. Ее вредное влияние усугубляется тем, что она склонна к ликвации.

Чтобы оценить распределение серы по Бауману, необходимо приготовить макрошлиф. Для этого поверхность образца шлифуют шлифовальной бумагой, промывают и сушат.

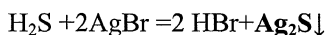
Затем берут лист бромсеребряной фотобумаги, смачивают ее в течение 2–3 минут в 5%-ном водном растворе серной кислоты, слегка просушивают между двумя листами фильтровальной бумаги для удаления излишнего раствора и накладывают эмульсионной стороной на

шлифованную поверхность макрошлифа. Фотобумагу слегка и осторожно, не допуская смещения, приглаживают рукой или резиновым валиком для удаления оставшихся между бумагой и макрошлифом пузырьков воздуха, так как эти пузырьки оставляют на бумаге белые пятна и маскируют результаты анализа. Время выдержки 3–5 минут. После этого бумагу снимают с макрошлифа, промывают водой и фиксируют в 10%-ном водном растворе гипосульфита натрия в течение 5–10 минут, затем промывают водой и сушат.

Действие реактива основано на следующем. Сернистые включения ( $\text{MnS}$ ,  $\text{FeS}$ ), имеющиеся в поверхностных участках металла, реагируют с серной кислотой, оставшейся на фотобумаге:



Образующийся сероводород взаимодействует с бромистым серебром фотоэмульсии:



Сернистое серебро имеет коричневый цвет. Полученные на фотобумаге темные участки коричневого цвета указывают форму и характер распределения сульфидов. Если фотобумага имеет однородную окраску, то, следовательно, сера распределена равномерно.

Серный отпечаток прикладывается к отчету.

## 1.6. Контрольные вопросы

1. В чем заключается макроструктурный метод исследования?
2. Какие методы используются в макроанализе?
3. Что такое макроструктура?
4. Какие дефекты позволяет выявить макроструктурный анализ?
5. Что можно установить по виду излома?
6. Какое разрушение называется вязким?
7. Какое разрушение называется хрупким?
8. Какое разрушение называется усталостным?
9. Каким изломом характеризуется вязкое разрушение?
10. Каким изломом характеризуется хрупкое разрушение?
11. Каким изломом характеризуется усталостное разрушение?
12. Что способствует появлению флокенов?
13. Какое расположение волокна в детали считать правильным?
14. Как выявить распределение серы по сечению макрошлифа методом Баумана?

## **2. МИКРОСТРУКТУРНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

Микроструктурный анализ заключается в исследовании структуры металла при больших увеличениях с помощью микроскопов.

Строение металла, наблюдаемое под микроскопом, называется микроструктурой. Части сплава, имеющие под микроскопом одинаковое строение, называются структурными составляющими.

*Микроструктурный анализ позволяет определить:*

- величину и форму зерен, из которых состоит металл или сплав;
- расположение фаз, составляющих сплав; выявить изменения внутреннего строения сплава, происходящих под влиянием различных видов обработки;
- обнаружить мельчайшие пороки металла (микротрещины, неметаллические включения и т.д.).

Микроструктуру металлов наблюдают в световом (оптическом) или электронном микроскопе.

Изучение структуры с помощью оптического микроскопа состоит из следующих этапов:

- а) приготовление микрошлифов;
- б) изучение микрошлифов в «нетравленном состоянии», т.е. после полирования, промывки и просушивания;
- в) травление шлифов для выявления структуры;
- г) исследование микроструктуры с помощью микроскопа.

### **2.1. Цель работы**

Ознакомиться с принципом работы металлографического микроскопа, техникой приготовления микрошлифов и наиболее типичными структурами металлов и сплавов.

### **2.2. Материал исследования**

Коллекция образцов технически чистых металлов, железоуглеродистых и цветных сплавов.

### **2.3. Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с принципом работы металлографических микроскопов и освоить простейшие приемы работы.
2. Ознакомиться с технологией изготовления и травления микрошлифов.
3. Просмотреть под микроскопом и зарисовать микроструктуру образцов.

## 2.4. Содержание отчета

Отчет должен включать:

- 1) цель работы;
- 2) описание приготовления и травления микрошлифов;
- 3) упрощенную оптическую схему микроскопа с кратким описанием;
- 4) схематические рисунки просмотренных микроструктур с необходимыми пояснениями.

## 2.5. Методические указания

Для проведения работы необходимо иметь металлографический микроскоп. Металлографические микроскопы, в отличие от биологических, работают в отраженном свете. Основными узлами микроскопа являются оптическая система, осветительная система с фотографической аппаратурой, механическая система. Оптическая система включает в себя объектив, окуляр и ряд вспомогательных оптических элементов: зеркала, призмы и т.д. Принципиальная схема оптической системы микроскопа показана на рис. 2.1.

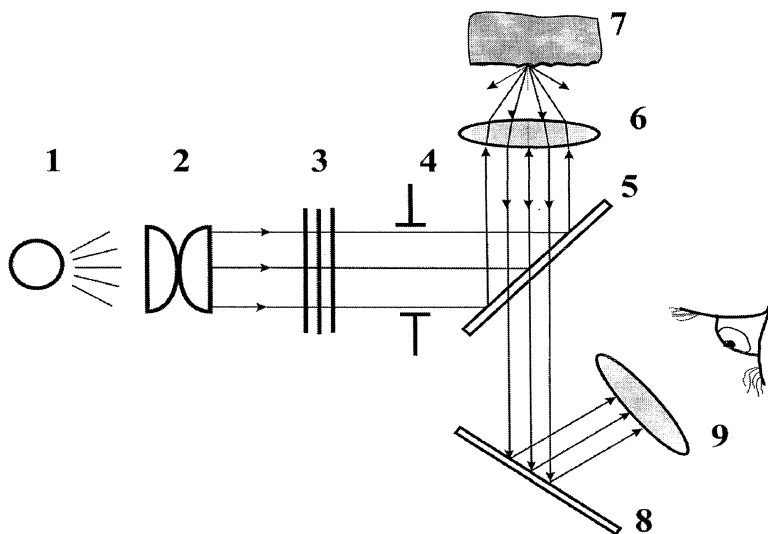


Рис.2.1. Принципиальная схема оптической системы металлографического микроскопа: 1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — светофильтры; 4 — диафрагма; 5 — полупрозрачная пластинка; 6 — объектив; 7 — объект (микрошлиф); 8 — зеркало; 9 — окуляр



Свет от осветителя 1 попадает в конденсор 2 (формирует яркий равномерный пучок), проходит через сменные светофильтры 3, апертурную диафрагму 4 (ограничивает световые пучки и обеспечивает высокую четкость изображения), преломляется пластинкой 5, проходит через объектив 6 и фокусируется на микрошлифе 7, установленном на предметном столике. Полученное изображение поверхности (в отраженных лучах) увеличивается объективом 6, отражается зеркалом 8 и еще раз увеличившись при прохождении окуляра, попадает в глаза наблюдателя.

Разрешающая способность оптического микроскопа, то есть минимальный размер детали структуры, различимые с его помощью, определяется длиной волны видимого света и не превышает 0,2 мкм (200нм). Увеличение микроскопа равно произведению увеличений объектива и окуляра. Микроскопы дают увеличение от 50 до 1500...2000 раз.

Исследование микроструктуры проводится на специально подготовленных образцах – микрошлифах. Микрошлиф – это небольшой образец, одну из плоскостей которого тщательно шлифуют, полируют и подвергают травлению специальными реактивами.

Образец вырезают из детали или слитка, причем место вырезки выбирают так, чтобы получить наибольшие сведения о структуре металла.

Мелкие образцы (например мелкие детали, проволока) помещают в металлическую оправку и заливают легкоплавким материалом. Применяют для этого сплав Вуда ( $t_{пл} = 76^{\circ}\text{C}$ ), пластмассы и другие материалы.

Сначала образец затачивают на наждачном круге, затем шлифуют на абразивной бумаге с постоянно уменьшающимися размерами зерен. При переходе с одного номера шлифовальной бумаги на другой образец промывают, протирают ватой или фильтровальной бумагой и поворачивают на  $90^{\circ}$ . На очередной бумаге шлифуют до тех пор, пока не исчезнут следы предыдущей обработки.

После окончания шлифования образец полируют на вращающемся круге, обтянутом сукном или фетром. Во время полировки ткань полировального круга периодически смачивают суспензией окиси хрома или окиси алюминия в воде, предварительно взбалтывая ее. Полирование считается законченным, когда поверхность шлифа при внешнем осмотре доведена до зеркального блеска, а при контроле под микроскопом не будет обнаружено царапин и грязи. Но полученная поверхность не позволяет судить о строении металла. На светлом фоне полированной поверхности выявляются только неметаллические включения (графит, сульфиды, оксиды и т.д.) и микродефекты (трещины, поры и т.д.).

Для исследования микроструктуры микрошлифы подвергают травлению, т.е. обрабатывают их слабыми растворами кислот, солей, щелочей (например, железоуглеродистые сплавы травят в 4%-ном растворе  $\text{HNO}_3$  в

этиловом спирте). При этом выявляются границы зерен, и различные составляющие структуры. Под влиянием реактивов происходит избирательное растворение фаз, а также внутренних границ раздела. Как следствие этого, на шлифе образуется микрорельеф. При освещении микрошлифа на микроскопе лучи света по-разному отражаются от различно протравившихся структурных составляющих. Места, протравленные сильнее, больше рассеивают отраженные лучи, поэтому в объективе микроскопа они получаются более темными. На рис.2.2 показано, что при травлении металла, состоящего из однородных зерен, выявляются их границы в виде темной сетки, так как границы травятся сильнее тела зерен, и на их месте образуются углубления, рассеивающие свет.

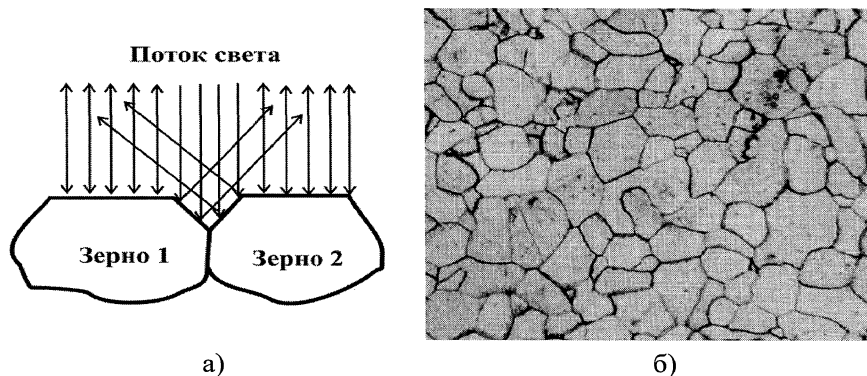


Рис. 2.2. Схема, поясняющая отражение потока света от поверхности микрошлифа (а) и микроструктура технически чистого железа (б)

## 2.6. Контрольные вопросы

1. В чем заключается микроструктурный анализ?
2. Что можно выявить при микроструктурном исследовании?
3. Что такое микроструктура?
4. Как правильно приготовить микрошлиф?
5. Как выявить структуру металла или сплава?
6. Чем отличаются металлографические микроскопы от биологических?
7. Как определить увеличение оптического микроскопа?

## 3. ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

Пластическая деформация характеризуется тем, что после снятия нагрузки форма и размеры тела полностью не восстанавливаются, а структура и свойства претерпевают необратимые изменения. Повышенная пластичность – способность к пластической деформации – является очень

важным свойством металлов. В зависимости от соотношения температуры, при которой происходит деформация, и температуры рекристаллизации данного металла различают *холодную* и *горячую* деформацию. Холодная – это деформация, которую проводят ниже температуры рекристаллизации ( $t_{\text{деф}} < t_{\text{рек}}$ ). Пластическая деформация при температурах выше температуры рекристаллизации ( $t_{\text{деф}} > t_{\text{рек}}$ ) является горячей. Горячую деформацию проводят при температурах  $0,6 \dots 0,7 T_{\text{пл}}$ .

При холодной деформации на три–четыре порядка повышается плотность дислокаций, что приводит к затруднению их движения и сопротивление металла деформированию возрастает. Металл упрочняется, а его способность к пластической деформации падает. Это явление называют наклепом или нагартовкой.

При горячей деформации одновременно с упрочнением протекают процессы разупрочнения за счет возврата и рекристаллизации. Если процесс рекристаллизации после горячей деформации успеет пройти в полном объеме, что приведет к полному устранению повышенной плотности дислокаций, то упрочнения металла не будет. Свойства металла останутся примерно такими, какими были до деформации.

### 3.1 Цель работы

Выяснить влияние холодной пластической деформации на микроструктуру и твердость металла.

### 3.2 Материал исследования

Отожженные пластинки алюминия технической степени чистоты. Температура плавления ( $t_{\text{пл}}$ ) алюминия  $660^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3. Порядок выполнения работы

1. По формуле Бочвара  $T_{\text{рек}} = \alpha T_{\text{пл}}$  (коэффициент  $\alpha$  принять равным 0,4) рассчитать температурный порог рекристаллизации для алюминия и убедиться, что деформация алюминия при комнатной температуре является холодной.

2. На отожженной пластинке измерить твердость на приборе Бринелля стальным шариком диаметром  $D = 10 \text{ мм}$ , под нагрузкой  $P = 250 \text{ кг}$ :

- путем вдавливания поставить отпечаток на поверхности пластинки;
- специальной лупой измерить диаметр отпечатка ( $d_{\text{омн}}$ );
- по полученному  $d_{\text{омн}}$  по таблице найти число твердости НВ.

3. Штангенциркулем измерить исходную толщину пластинки  $H_0$ .

4. Отожженную пластинку алюминия продеформировать прокаткой на лабораторном прокатном стане на 4...5 заданных степени деформации ( $\epsilon$ ), например 5%, 10%, 20%, 30%, 50%. Степень деформации задается по из-

менению толщины пластинки в результате деформирования и определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{H_0 - h_k}{H_0} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

где  $\varepsilon$  – степень деформации, %;  $H_0$  – начальная толщина пластинки, мм;  $h_k$  – толщина пластинки после деформации, мм.

Чтобы прокатать пластинку на заданную  $\varepsilon$ , нужно подсчитать, какую толщину она должна иметь после деформации, по формуле (3.2).

$$h_k = \frac{H_0 \cdot 100 - H_0 \cdot \varepsilon}{100} \quad (3.2)$$

Заданная степень деформации достигается за несколько проходов. Поскольку толщина пластинки после прокатки может отличаться от той, которую определили по расчетам, находят действительную степень деформации по формуле (3.1), в которую подставляют полученные экспериментально значения  $h_k$ .

5. После каждой степени деформации измерить твердость по Бринеллю. Полученные данные занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

До деформации ( $\varepsilon=0$ )			После деформации			
$H_0$ , мм	$d_{отп}$ , мм	НВ	$h_k$ , мм	$\varepsilon$ , %	$d_{отп}$ , мм	НВ

6. Построить график зависимости твердости алюминия от степени деформации.

7. Сделать вывод по работе.

### 3.4. Методические указания

Если рассматривать отдельный кристалл, то его пластическая деформация происходит путём сдвига одной части кристалла относительно другой. Сдвиг вызывают касательные напряжения  $\tau$ , когда их величина превысит определённое критическое значение. Сдвиг может осуществляться *скольжением* и *двойникованием*, причём деформация скольжением является преобладающей.

Сдвиг нельзя представить как одновременное перемещение одной части кристалла относительно другой (рис. 3.1). Для такого жесткого синхронного сдвига потребовались бы напряжения, в сотни и даже тысячи раз большие по сравнению с действительными.

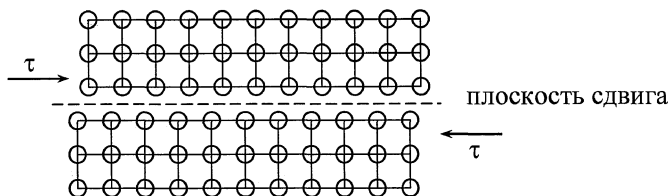


Рис. 3.1. Схема сдвига при пластической деформации скольжением

В реальных кристаллах всегда присутствуют дислокации. Они могут легко двигаться по кристаллу и облегчать сдвиг. Как видно из рис. 3.2, для того, чтобы дислокация под действием напряжений  $\tau$  переместилась из исходного положения 1 в соседнее положение 4, достаточно небольших перемещений атомов:  $1 \rightarrow 2$ ,  $3 \rightarrow 4$ ,  $5 \rightarrow 6$ ,  $7 \rightarrow 8$ ,  $10 \rightarrow 9$ ,  $12 \rightarrow 11$ . Перемещение дислокации требует небольших смещений атомов и, соответственно, для этого необходимы небольшие напряжения. Когда дислокация выйдет на поверхность, произойдет сдвиг. Элементарный акт сдвига можно представить как эстафетное перемещение атомов на небольшие расстояния. Деформация осуществляется путём перемещения дислокаций.

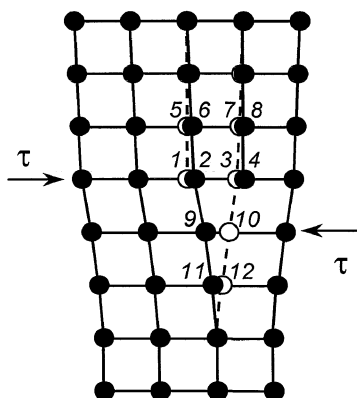


Рис. 3.2. Смещение атомов при перемещении дислокации слева направо на одно межатомное расстояние. Исходное положение показано пунктирными линиями

Скольжение дислокаций происходит по плоскостям и направлениям, в которых плотность упаковки атомов максимальна. Такие плоскости и на-

правления для основных типов кристаллических решёток показаны на рис.3.3.

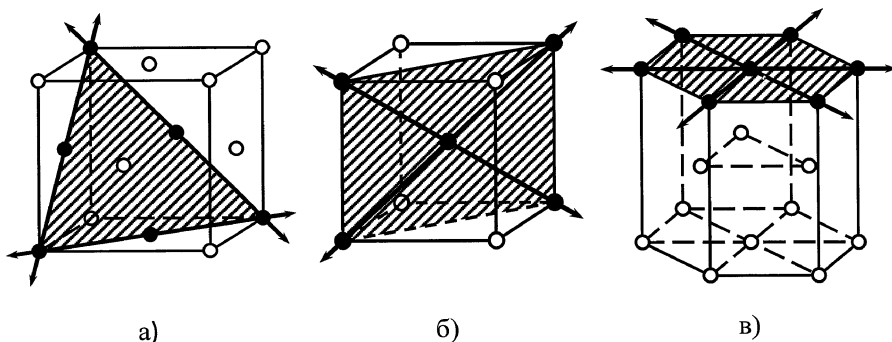


Рис. 3.3. Плоскости и направления наилегчайшего скольжения в металлах с решётками ГЦК (а), ОЦК (б) и ГПУ (в)

В процессе пластической деформации приходят в движение не только имеющиеся дислокации, но образуются и новые.

В поликристаллах пластическая деформация происходит более сложно и вызывает в металле ряд структурных изменений:

- зерна металла вытягиваются в направлении деформации (рис. 3.4) и приобретают форму листочков, если металл прокатан в лист, или волокон, если он вытянут в проволоку.

- при больших степенях деформации в поликристаллическом металле, возникает преимущественная кристаллографическая ориентировка зерен, называемая текстурой деформации. При деформации зерна закономерно поворачиваются таким образом, чтобы плоскости скольжения были благоприятно ориентированы по отношению к направлению действия внешних сил. Текстура тем существенней, чем больше степень деформации. Образование текстуры вызывает анизотропию свойств (неодинаковость свойств по разным направлениям пространства) деформированного металла.

При деформации волокнистая структура и текстура возникают одновременно, однако вытянутость зерен (волокнистая структура) еще не свидетельствует о наличии текстуры. Для определения текстуры необходимы специальные методы исследования, например, рентгеноструктурный.

- повышается плотность дислокаций от  $10^6 \dots 10^8$  до  $10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-2}$  после значительной деформации. При холодной деформации увеличивается прочность металла тем в большей степени, чем больше величина деформации. Способность к деформации при этом уменьшается. Явление наклепа обусловлено искажением кристаллической решетки за счет увеличения количества дефектов, главным образом, дислокаций. Наклепанный металл имеет неравновесную структуру.

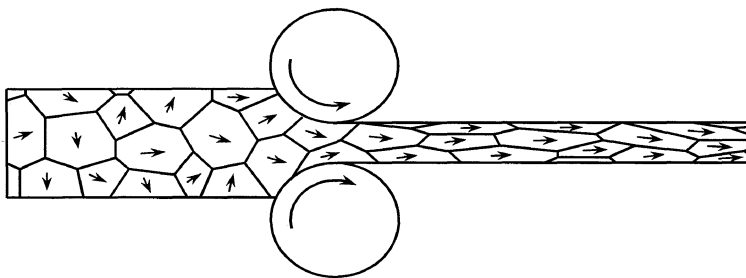


Рис. 3.4. Схема влияния деформации прокаткой на структуру поликристаллического металла: зёрна вытягиваются вдоль направления прокатки и возникает текстура (стрелки соответствуют одному и тому же кристаллографическому направлению)

Пластическая деформация металлов сопровождается одновременно изменением физико-химических свойств (плотности, электропроводности, магнитных свойств и т.д.).

### 3.5. Контрольные вопросы

1. Что такое наклеп и каковы его причины?
2. Как изменяются механические свойства металла при наклепе?
3. Какую структуру имеет холоднодеформированный металл?
4. Что такое текстура деформации?
5. Какие плоскости являются плоскостями сдвига в решетках ОЦК, ГЦК, ГПУ?
6. Какие напряжения вызывают сдвиг при пластической деформации?
7. Какую деформацию называют холодной?
8. Какую деформацию называют горячей?
9. Один из двух образцов одного и того же металла подвергнут пластической деформации при температуре ниже температуры рекристаллизации, другой — на ту же степень при температуре выше температуры рекристаллизации. Как будет соотноситься твердость каждого из них после деформации с начальной (до деформации) твердостью?
10. Можно ли повысить твердость олова ( $t_{пл.}=232^{\circ}\text{C}$ ), меди ( $t_{пл.}=1083^{\circ}\text{C}$ ) и железа ( $t_{пл.}=1539^{\circ}\text{C}$ ) пластической деформацией при комнатной температуре ( $20^{\circ}\text{C}$ )?
11. Определите будет ли деформация свинца при комнатной температуре сопровождаться наклепом. Температура плавления свинца составляет  $327^{\circ}\text{C}$ .
12. Определите будет ли деформация никеля ( $t_{пл.}=1453^{\circ}\text{C}$ ), проводимая при температуре  $150^{\circ}\text{C}$ , сопровождаться наклепом.

## 4. РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫЙ ОТЖИГ

Чтобы вернуть холоднодеформированному металлу способность к деформированию, его подвергают нагреву до определенной температуры, т.е. рекристаллизационному отжигу. При этом изменяются микроструктура металла, а следовательно и его свойства: увеличивается пластичность и понижается прочность.

Размер рекристаллизационного зерна — важная характеристика отожженного металла. Путем пластической деформации и последующего рекристаллизационного отжига можно очень сильно как измельчить исходное крупное зерно металла, так и увеличить, меняя условия обработки.

### 4.1. Цель работы

Выяснить влияние рекристаллизационного отжига на структуру и свойства холоднодеформированного металла.

### 4.2. Материал исследования

Холоднодеформированные пластинки алюминия.

### 4.3. Порядок выполнения работы

1. Пластинку, ранее продеформированную (на предыдущем занятии) на максимальную степень деформации  $\epsilon =$  и имеющую твердость  $HВ =$ , подвергнуть рекристаллизационному отжигу по режиму:  $T=550^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau=30$  мин, охлаждение на воздухе. Напомним, что рассчитанный температурный порог рекристаллизации для алюминия составляет  $100^{\circ}\text{C}$ .

2. Замерить твердость отожженной пластинки. Сравнить с твердостью деформированной пластинки. Сделать вывод о влиянии рекристаллизационного отжига на свойства металла.

3. Пластинку зачистить наждачной шкуркой и протравить в 50%-ном водном растворе соляной кислоты для выявления макроструктуры. Выявленную макроструктуру зарисовать. Сравнить с макроструктурой литого металла. Отметить дендритное строение литого металла. Сделать вывод о влиянии пластической деформации со степенью  $\epsilon \gg \epsilon_{кр}$  на размер рекристаллизованного зерна.

4. После рекристаллизационного отжига пластинку алюминия продеформировать на различные степени деформации путем ее загиба на  $180^{\circ}$  или пробивки в ней отверстия.

5. Деформированную таким образом пластинку вновь подвергнуть рекристаллизационному отжигу по указанному режиму.

6. Пластинку протравить в растворе соляной кислоты и зарисовать выявленную макроструктуру по всей длине пластинки. Сделать вывод о



влиянии степени предварительной деформации на размер рекристаллизованного зерна.

#### 4.4. Методические указания

В предыдущей работе металл подвергался холодной пластической деформации. При такой деформации увеличивается прочность металла, а пластичность уменьшается. Причина – повышение плотности дислокаций.

Деформированный металл находится в неравновесном, неустойчивом состоянии. При нагреве такого металла протекают процессы, приводящие его в более равновесное состояние: возврат и рекристаллизация.

При низких температурах (до  $0,2...0,3 T_{пл.}$ , К) происходит возврат. Он заключается в уменьшении концентрации вакансий и перераспределения дислокаций без изменения их плотности. При возврате обычно механические свойства меняются весьма незначительно, т.е. существенного снятия наклепа не происходит. Однако некоторые физические свойства, например, электросопротивление, могут значительно меняться из-за уменьшения концентрации вакансий и некоторого перераспределения дислокаций. С помощью оптического микроскопа заметных изменений в микроструктуре после возврата не выявляется.

Рекристаллизация происходит при более высоких температурах. Для технически чистых металлов при температурах  $0,3...0,4 T_{пл.}$ . Различают первичную рекристаллизацию (рекристаллизация обработки), собирательную и вторичную.

При первичной рекристаллизации происходит образование и рост новых зерен с неискаженной структурой за счет деформированных зерен. Зарождение новых зерен происходит в участках с наибольшими искажениями кристаллической решетки, как правило, на границах зерен (рис. 4.1, б). Их рост сопровождается увеличением рекристаллизованного объема металла. Первичная рекристаллизация заканчивается тогда, когда полностью исчезают исходные деформированные зерна (см. рис. 4.1, в).

Как только заканчивается первичная рекристаллизация, при дальнейшем нагреве начинается собирательная рекристаллизация, при которой все зерна подрастают с примерно одинаковой скоростью (см. рис. 4.1, г).

Дальнейшее повышение температуры может привести к развитию вторичной рекристаллизации, при которой происходит интенсивный рост некоторых зерен за счет других. При этом возникают зерна-гиганты, в то время как большинство зерен остаются сравнительно мелкими (см. рис. 4.1, д). В результате в структуре наблюдается разноразмерность.

Первичная рекристаллизация идет центровым путем, т.е. возникают новые зародышевые центры. Они имеют ту же кристаллическую решетку, что и матрица, но отличаются от нее меньшими искажениями. Вторичная

рекристаллизация идет бесцентровым путем. Роль зародышевых центров в этом случае выполняют зерна с наименьшей степенью искаженности.

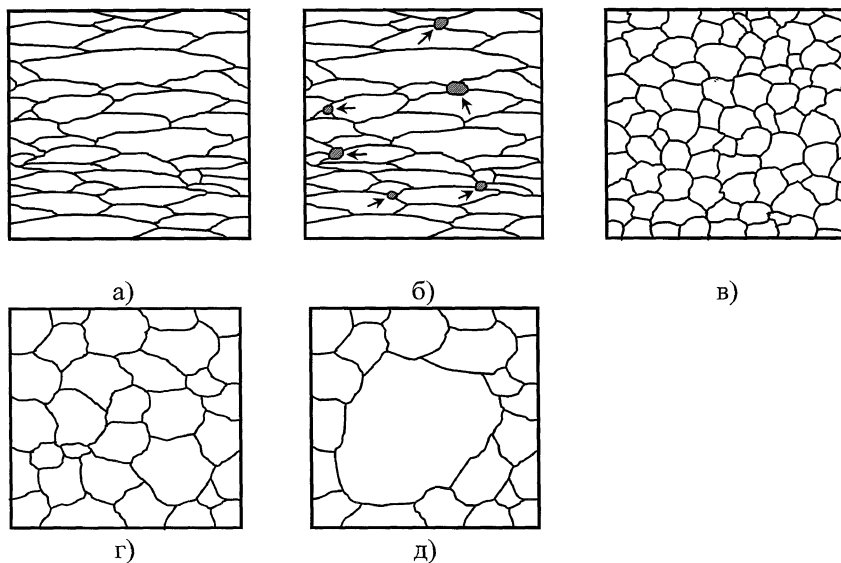


Рис. 4.1. Изменение микроструктуры деформированного металла при нагреве:

- а — деформированный металл; б — начало первичной рекристаллизации (стрелками показаны появившиеся рекристаллизованные зёрна);  
в — завершение первичной рекристаллизации;  
г — развитие собирательной рекристаллизации  
д — начало вторичной рекристаллизации

В результате рекристаллизации возникают новые зерна, размеры которых зависят от многих факторов:

- размера исходного зерна;
- степени предварительной деформации;
- температуры и скорости нагрева;
- длительности выдержки;
- наличия примесей и др.

Для металла данной степени чистоты с исходным мелким зерном размер рекристаллизованного зерна в первую очередь определяется степенью деформации перед нагревом (рис. 4.2).

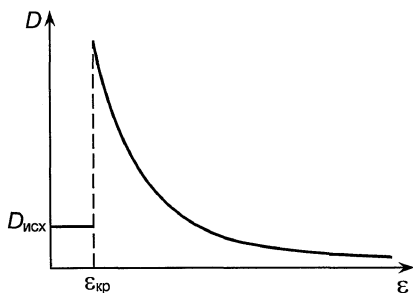


Рис. 4.2. Влияние степени пластической деформации ( $\epsilon$ ) на величину рекристаллизованного зерна ( $D$ ):

$D_{\text{исх}}$  — исходный размер зерна;

$\epsilon_{\text{кр}}$  — критическая степень деформации

При нагреве металла, деформированного на небольшие степени деформации  $\epsilon < \epsilon_{\text{кр}}$ , рекристаллизация не происходит. Критической называется минимальная степень деформации ( $\epsilon_{\text{кр}}$ ), после которой при нагреве становится возможным протекание процесса рекристаллизации. Она зависит от степени чистоты металла и составляет обычно 3...10%. После такой сравнительно небольшой деформации в металле всегда есть зерна, в которых деформация не прошла. Поэтому при рекристаллизации новые зародышевые центры не возникают, а их роль выполняют неискаженные зерна, которые растут за счет более искаженных (бесцентровая рекристаллизация). В связи с этим после  $\epsilon_{\text{кр}}$  зерно крупное. С увеличением степени деформации ( $\epsilon > \epsilon_{\text{кр}}$ ) неискаженных зерен становится все меньше, бесцентровая рекристаллизация постепенно заменяется центральной, число зародышевых центров увеличивается и поэтому зерно получается все более мелким.

#### 4.6. Контрольные вопросы

1. Как определить температурный порог рекристаллизации?
2. Что такое первичная рекристаллизация?
3. Как изменяется микроструктура металла после первичной рекристаллизации?
4. Что происходит при собирательная рекристаллизация?
5. Как изменяются механические свойства металла после рекристаллизационного отжига?
6. Объясните, возможно ли протекание рекристаллизации при нагреве металла, не подвергавшегося предварительной холодной пластической деформации?
7. Что такое критическая степень деформации?
8. Объясните, почему при горячей обработке давлением не рекомендуется проводить последнюю операцию с малой степенью обжатия?
9. Как влияет размер зерна стали на ее склонность к хрупкому разрушению и порог хладноломкости?

## **5. ИЗУЧЕНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД**

Сплавы железа с углеродом, т.е. стали и чугуны, наиболее широко применяются в технике. Для анализа превращений, протекающих в этих сплавах, используют диаграммы состояний: метастабильную — железо–цементит и стабильную — железо–графит.

Диаграммы состояния дают представления о структурах и фазовом составе сплавов после медленного охлаждения.

### **5.1 Цель работы**

Ознакомиться с диаграммой состояния железо–цементит.

### **5.2 Материал исследования**

Диаграмма состояния железо–цементит. Альбомы с фотографиями микроструктур сталей и чугунов, коллекция микрошлифов.

### **5.3. Порядок выполнения работы**

1. Вычертить диаграмму состояния Fe–Fe<sub>3</sub>C. Назвать характерные линии и точки диаграммы;

2. Указать, как взаимодействуют компоненты данной системы в жидком и твердом состоянии. Описать фазы и структурные составляющие сплавов.

3. В соответствующих областях диаграммы обозначить фазы и структурные составляющие.

4. Указать техническое название сплава определенного химического состава.

5. Определить химический состав и количественное соотношение фаз при температуре, заданной преподавателем.

6. Указать технологические свойства данного сплава и каким способом могут быть изготовлены из него заготовки деталей (путем литья или пластической деформации).

### **5.4. Содержание отчета**

Отчет должен быть оформлен в соответствии с пунктами порядка выполнения работы

### **5.5. Методические указания**

#### ***Компоненты и фазы в системе железо–углерод***

Главными компонентами железоуглеродистых сплавов является железо и углерод.

Железо имеет температуру плавления  $1539^{\circ}\text{C}$ . Металл полиморфный и существует в двух модификациях:  $\alpha$  с решеткой ОЦК до температуры  $911^{\circ}\text{C}$  и  $\gamma$  с решеткой ГЦК в интервале  $911\text{--}1392^{\circ}\text{C}$ . При более высоких температурах железо вновь имеет решетку ОЦК ( $\delta$ -железо). Температуры равновесия  $\text{Fe}_{\alpha} \leftrightarrow \text{Fe}_{\gamma}$  ( $911^{\circ}\text{C}$ ) и  $\text{Fe}_{\gamma} \leftrightarrow \text{Fe}_{\delta}$  ( $1392^{\circ}\text{C}$ ) обозначаются как точки

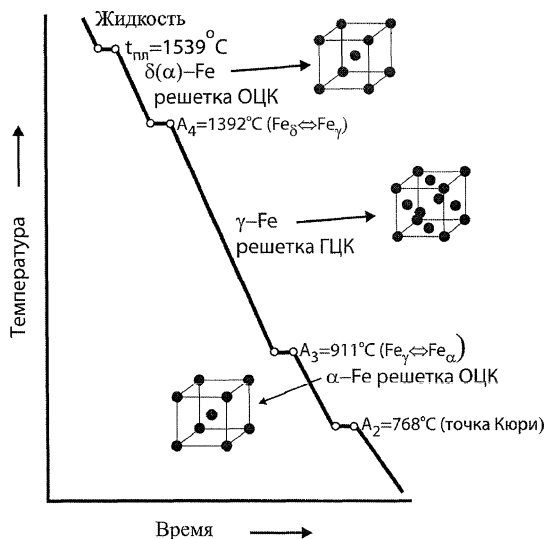


Рис. 5.1. Кривая охлаждения чистого железа

$A_3$  и  $A_4$  соответственно. При температурах ниже  $768^{\circ}\text{C}$  (точка Кюри) железо является ферромагнитным, при более высоких температурах железо становится парамагнитным. На кривой охлаждения чистого железа (рис. 5.1) показаны температурные интервалы существования различных модификаций Fe.

Углерод является неметаллическим элементом с температурой плавления  $(3850 \pm 50)^{\circ}\text{C}$ . Он существует в нескольких модификациях, из которых в обычных условиях стабилен графит.

В системе железо–углерод различают следующие фазы.

**Феррит (Ф)** — твёрдый раствор внедрения углерода в железо с решеткой ОЦК. Предельная растворимость углерода составляет в  $\alpha$ -феррите 0,02%, в  $\delta$ -феррите — 0,1%. Феррит — мягкая пластичная фаза с твердостью  $\text{HB} = 80 \dots 100$ .

**Аустенит (А)** — твёрдый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -Fe, имеющий ГЦК решётку. Предельная растворимость углерода в аустените составляет 2,14%. Аустенит обладает высокой пластичностью, относительно невысокой твердостью ( $\text{HB} 160 \dots 180$ ) и прочностью.

**Цементит (Ц)** — химическое соединение железа с углеродом, карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ . В цементите содержится 6,67%С. Он имеет сложную решётку. Температура плавления цементита составляет  $1262^{\circ}\text{C}$ . Цементит является твёрдой ( $\text{HB} \sim 800$ ) и хрупкой фазой.

**Графит (Г)** — углерод, выделяющийся в железоуглеродистых сплавах в свободном состоянии. Он имеет сложную гексагональную решётку, мягок и характеризуется малой прочностью.

Цементит является метастабильной фазой и при нагреве до высоких температур может распадаться на железо и графит. Этот процесс называют графитизацией.

Диаграммы состояния позволяют описать как фазовый состав, так и структуру сплава. В этом случае диаграммы называют, соответственно, фазовой или структурной.

### Фазовая диаграмма состояния железо-цементит ( $Fe-Fe_3C$ )

Как и любая диаграмма состояния сплавов двойных систем, диаграмма состояния  $Fe-Fe_3C$  строится в координатах «температура-концентрация компонентов». Диаграмма состояния железо-цементит (рис. 5.2) показывает фазовый состав сплавов с концентрацией от чистого железа до цемента (6,67%С).

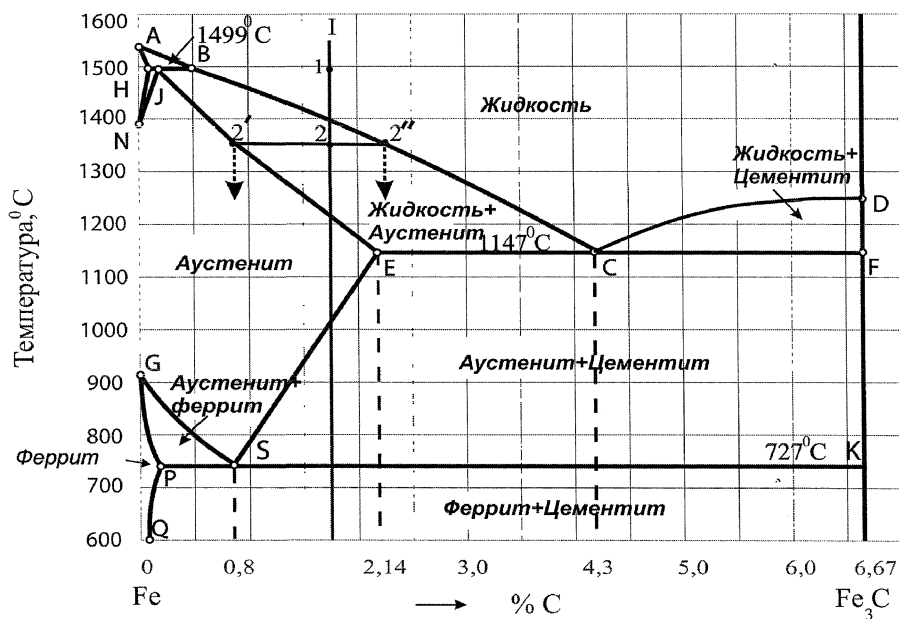


Рис. 5.2. Диаграмма состояния железо-цементит

На оси абсцисс крайняя левая точка соответствует 100% Fe, а правая точка 100%  $Fe_3C$ . Слева направо увеличивается концентрация углерода. По оси ординат откладывают температуру. На ординате, соответствующей чистому железу, откладывают температуру его плавления и полиморфных превращений. Точка A (1539 $^{\circ}C$ ) отвечает температуре плавления железа, а точки N (1392 $^{\circ}C$ ) и G (911 $^{\circ}C$ ) соответствуют полиморфным превращениям

ОЦК $\leftrightarrow$ ГЦК. На ординате, соответствующей  $\text{Fe}_3\text{C}$  отмечается точка  $D$  ( $1262^\circ\text{C}$ ) – температуре плавления цементита. Координаты характерных точек диаграммы указаны в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Характерные точки диаграммы состояния  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$

Обозначение точки	Температура, $^\circ\text{C}$	Концентрация углерода, %	Характеристика точки
$A$	1539	0	Температура плавления железа
$N$	1392	0	Температура полиморфного превращения $\text{Fe}_\delta - \text{Fe}_\gamma$
$D$	1262	6,67	Температура плавления цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )
$H$	1499	0,1	Предельная растворимость углерода в $\text{Fe}_\delta$
$J$	1499	0,16	Состав аустенита при перитектическом превращении
$B$	1499	0,51	Состав жидкой фазы при перитектическом превращении
$E$	1147	2,14	Предельная растворимость углерода в $\text{Fe}_\gamma$
$C$	1147	4,3	Состав жидкой фазы при эвтектическом превращении
$F$	1147	6,67	Состав цементита при эвтектическом превращении
$G$	911	0	Температура полиморфного превращения $\text{Fe}_\alpha - \text{Fe}_\gamma$
$P$	727	0,02	Предельная растворимость углерода в $\text{Fe}_\alpha$
$S$	727	0,8	Состав аустенита при эвтектоидном превращении
$K$	727	6,67	Состав цементита при эвтектоидном превращении
$Q$	20	0,006	Растворимость углерода в $\text{Fe}_\alpha$ при комнатной температуре

Любая точка диаграммы (например точка 1 или 2 см. рис. 5.2) показывает химический состав сплава и температуру. Такие точки называют *фигуративными точками* системы.

Линии на диаграмме состояния разделяют области с различным фазовым составом.

Линия *ABCD*, называемая линией *ликвидус*, соответствует началу кристаллизации сплавов при охлаждении. При температурах выше линии ликвидус все сплавы находятся в жидком состоянии.

Линия *АНJECF*, называемая линией *солидус*, характеризует окончание затвердевания сплавов. При температурах ниже линии солидус все сплавы находятся только в твердом состоянии.

К чистому железу примыкают три однофазные области существования твёрдых растворов: область  $\delta$ -феррита *NHA*, область аустенита *GSEJN* и область  $\alpha$ -феррита *QPG*. Точки *H* и *P* характеризуют предельную растворимость углерода в  $\delta$ - и  $\alpha$ -феррите, а точка *E* — в аустените. Линии *SE* и *PG* являются линиями предельной растворимости углерода в аустените и  $\alpha$ -феррите соответственно. Ниже этих линий растворимость углерода в фазах уменьшается и избыточный углерод начинает выделяться в виде цементита. Если цементит, кристаллизующийся непосредственно из жидкой фазы называется *первичным*, то цементит, выделяющийся из аустенита носит название *вторичного*, а выделяющийся из  $\alpha$ -феррита — *третичного*.

Всего на диаграмме пять однофазных областей: область жидкого раствора (выше линии *ABCD*), область существования цементита (6,67%С) и три области твёрдых растворов.

Между однофазными областями лежат двухфазные. Чтобы определить какие фазы находятся в равновесии в двухфазных областях диаграммы, необходимо через любую точку внутри этой области провести горизонтальную линию до пересечения с ближайшими линиями диаграммы и указать с какими однофазными областями данная область граничит. Эту горизонтальную линию называют конодой ( $2' - 2''$ ) (см. рис. 5.2.).

*По диаграмме состояний можно определить:*

1. Из каких фаз состоит данный сплав при определенной температуре. Например сплав I при температуре 1500<sup>0</sup>С (точка 1) находится в жидком состоянии, а при температуре 1350<sup>0</sup>С (точка 2) в равновесии присутствуют две фазы: жидкость и аустенит (см. рис. 5.2.).

2. Химический состав фаз.

В однофазной области состав фазы совпадает с составом сплава. Для определения химического состава фаз в двухфазной области используют *правило концентраций*: через фигуративную точку, характеризующую состояние сплава (например, точку 2) проводят горизонтальную линию до пересечения с линиями, ограничивающими данную область – коноду (см. рис.5.2). Проекция точек пересечения (точки 2' и 2'') на ось концентраций покажут химический состав фаз. Проекция точки 2' покажет состав аустенита, а точки 2'' покажет химический состав жидкой фазы.

3. Количественное соотношение находящихся в равновесии фаз.



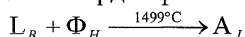
В однофазной области количество фазы совпадает с количеством сплава и в процентном выражении составляет 100%.

Количество фаз в двухфазной области определяется по *правилу рычага* (*правилу отрезков*). Через заданную точку диаграммы (точку 2) также необходимо провести коноду. Для вычисления доли фазы от всей массы сплава (в процентах) при заданной температуре берётся отношение длины отрезка коноды, противолежащего этой фазе, к длине всей коноды. Для фигуративной точки 2 количество аустенита  $Q_A = \frac{2-2''}{2'-2''} \cdot 100\%$ , а количество жидкой фазы:  $Q_L = \frac{2'-2}{2'-2''} \cdot 100\%$ .

На диаграмме имеются три горизонтальные линии, соответствующие особым превращениям. Все эти превращения протекают при постоянной температуре и постоянных концентрациях фаз.

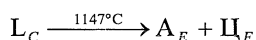
1. Линия  $HJB$  ( $1499^{\circ}\text{C}$ ) — линия *перитектического* превращения.

Перитектическим называют превращение при котором две фазы (жидкая и твердая) определенных составов взаимодействуют между собой, в результате чего образуется новая твердая фаза.



2. Линия  $ECF$  ( $1147^{\circ}\text{C}$ ) — линия *эвтектического* превращения.

Эвтектическим называют превращение при котором из жидкой фазы определенного состава одновременно выделяются две твердые фазы определенного состава. В железоуглеродистых сплавах заключается в распаде жидкой фазы состава  $C$  на две твердые фазы: аустенит состава  $E$  и цементит:



При этом образуется смесь аустенита и цементита (эвтектика), которая носит название *ледебурит*. Ледебурит характеризуется высокой твердостью ( $HV \approx 6000$  МПА) и является хрупким. Ледебурит это не фаза, а структурная составляющая, содержащая две фазы.

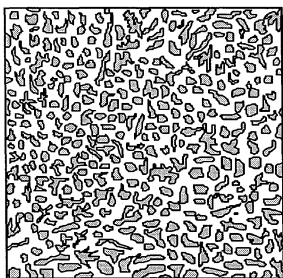


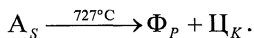
Рис. 5.3. Структура ледебурита (схема)

Под структурными составляющими понимают обособленные части сплава, имеющие при микроструктурном исследовании свое строение с присущими им характерными особенностями. Ледебурит наиболее часто имеет сотовое строение (рис. 5.3). Основу ледебурита составляет цементит, пронизанный ветвями аустенита.

Точка  $C$  ( $4,3\%\text{C}$ ) является эвтектической точкой. Чтобы написать эвтектическое превращение необходимо взять сплав эвтектического состава ( $4,3\%\text{C}$ ) и рассмотреть какие фазы с какими концентрациями существуют чуть выше и чуть ниже

температуры эвтектического превращения ( $1147^{\circ}\text{C}$ ).

3. Линия  $PSK$  ( $727^{\circ}\text{C}$ ) — линия *эвтектоидного* превращения, при котором одна твёрдая фаза (аустенит состава  $S$ ) распадается на две другие твёрдые фазы ( $\alpha$ -феррит состава  $P$  и цементит):



Образовавшаяся смесь двух твёрдых фаз называется *эвтектоидом*. В железоуглеродистых сплавах эвтектоидная смесь феррита и цементита носит название *перлит*. Перлит также как и ледебурит, не фаза, а структурная составляющая. Перлит состоит из чередующихся пластинок феррита и цементита, которые объединены в отдельные колонии (рис. 5.4.) Это достаточно прочная структурная составляющая ( $\text{HВ} \approx 1200\text{--}2200 \text{ МПа}$ ).

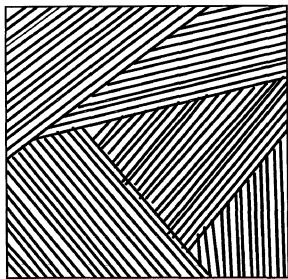


Рис. 5.4. Структура перлита (схема)

Точка  $S$  ( $0,8\%\text{C}$ ) называется эвтектоидной точкой. Чтобы написать эвтектоидное превращение необходимо взять сплав эвтектоидного состава ( $0,8\%\text{C}$ ) и рассмотреть какие фазы с какими концентрациями существуют чуть выше и чуть ниже температуры эвтектоидного превращения ( $727^{\circ}\text{C}$ ).

Все сплавы системы  $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$  состоят из двух фаз феррита (мягкого, пластичного) и цементита (твёрдого, хрупкого), но отличаются количеством этих фаз, структурой, а следовательно и свойствами. С повышением содержания углерода количество цементита в сплавах возрастает.

### **Структурная диаграмма состояний железо-цементит.**

В качестве структурных составляющих могут выступать как отдельные фазы, так и продукты фазовых превращений ледебурит (эвтектическая смесь аустенита и цементита) и перлит (эвтектоидная смесь феррита и цементита).

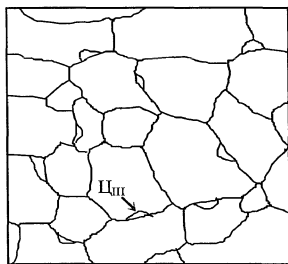


Рис. 5.5. Схема структуры технического железа ( $0,02\%\text{C}$ )

Сплавы, содержащие до  $0,02\%\text{C}$ , носят название *технического железа*. При содержании углерода более  $0,006\%$  их структура состоит из феррита (светлые зерна) с небольшим количеством третичного цементита, располагающегося в основном по границам зерен феррита (рис. 5.5)

По структурному признаку сплавы  $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$  делятся на стали и чугуны (рис. 5.6).

Сплавы, содержащие от  $0,02$  до  $2,14\%\text{C}$ , называют *сталями*, им соответствует участок диаграммы между точками  $P$  и  $E$ . Главным структурным признаком сталей является наличие в струк-

туре эвтектоида (*перлита*). Стали после затвердевания не содержат хрупкой структурной составляющей – ледебурита и при нагреве выше линии GSE имеют аустенитную структуру, которая обладает высокой пластичностью. В связи с этим стали легко деформируются при нормальных и повышенных температурах, т.е. являются в отличие от чугуна деформируемыми сплавами.

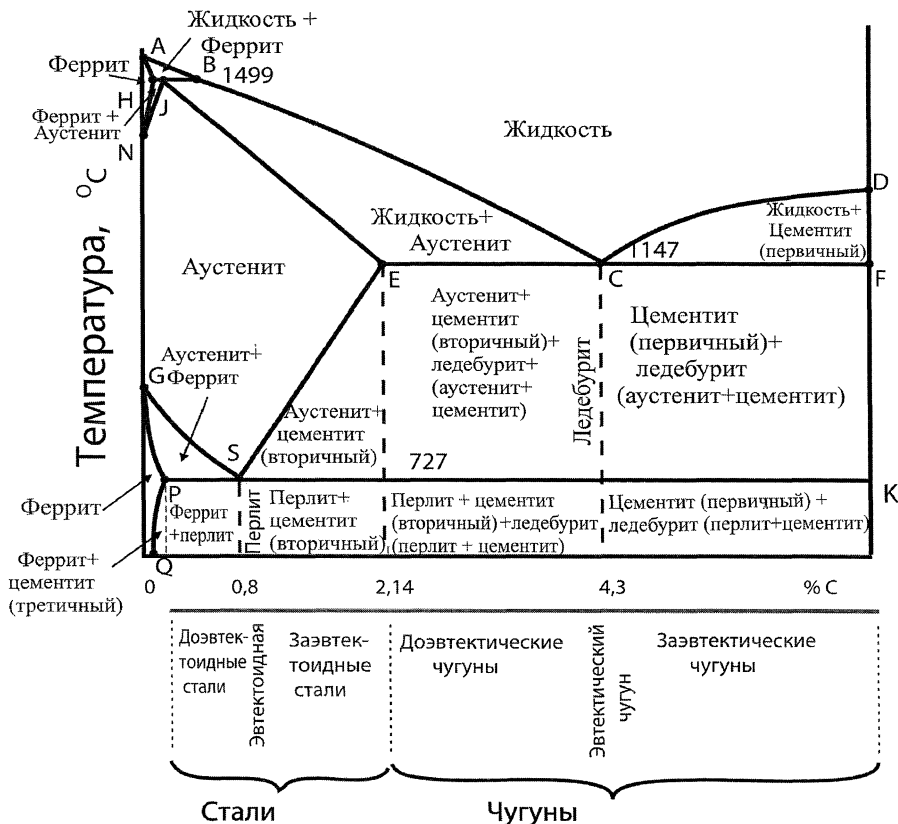


Рис. 5.6. Структурная диаграмма Fe-Fe<sub>3</sub>C

Сплавы, содержащие от 2,14 до 6,67%С (участок диаграммы от E до F), называются *чугунами*. Главным структурным признаком чугунов является наличие в структуре легкоплавкой эвтектики (*ледебурита*). Благодаря ее присутствию чугуны по сравнению со сталью обладают более низкими температурами плавления и лучшими литейными свойствами, в частности, хорошей жидкотекучестью и малой усадкой. Чугуны широко используются в качестве литейных материалов.

## 5.6. Контрольные вопросы

1. Укажите температурные интервалы существования  $\delta$ -железа,  $\gamma$ -железа и  $\alpha$ -железа.
2. Какой тип твердого раствора образует углерод с железом?
3. Что такое феррит, аустенит, цементит (дайте определение этих фаз, укажите тип кристаллической решетки, максимальную растворимость углерода и свойства)?
4. На какие вопросы отвечает диаграмма состояния?
5. Как по диаграмме состояния определить концентрацию (состав) находящихся в равновесии фаз и их количественное соотношение?
6. Что представляет собой перлит, ледебурит. В результате каких превращений они образуются?
7. Из какой фазы выделяется  $\text{Ц}_I$  (первичный),  $\text{Ц}_{II}$  (вторичный) и  $\text{Ц}_{III}$  (третичный)?
8. Какие сплавы называют сталями и чугунами?

## 6. СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

Диаграмма состояния показывает изменение равновесного состояния сплава в зависимости от температуры и концентрации. Равновесное состояние достигается, при очень медленном охлаждении (нагреве).

### 6.1. Цель работы

Ознакомиться со структурами сталей после медленного охлаждения.

### 6.2. Материал исследования

Диаграмма состояния железо-цементит. Альбомы с фотографиями микроструктур сталей и коллекция микрошлифов.

### 6.3. Порядок выполнения работы

1. Рассмотреть процесс кристаллизации и формирование структуры сталей с указанным содержанием углерода. Построить для них кривые охлаждения и в указанных точках определить концентрацию (состав) и количественное соотношение фаз.
2. Изучить и зарисовать микроструктуры доэвтектоидных, эвтектоидной и заэвтектоидных сталей, обозначить структурные составляющие.

### 6.4. Содержание отчета

Отчет должен включать:

- 1) цель работы;
- 2) диаграмму состояния железо-цементит;

3) схематические рисунки микроструктур сталей (доэвтектоидных, эвтектоидной и заэвтектоидных).

### 6.5. Методические указания

По структуре в равновесном состоянии углеродистые стали делятся на три группы: доэвтектоидные ( $C$  от 0,02 до 0,8%); эвтектоидная ( $C=0,8\%$ ) и заэвтектоидные ( $C$  от 0,8 до 2,14% включительно) (см. рис. 5.3).

Рассмотрим, как протекают фазовые превращения в сталях при охлаждении.

#### 1. Эвтектоидная сталь с содержанием $C=0,8$ (I) (рис.6.1).

При понижении температуры от точки  $a$  до точки  $I$  идет простое охлаждение жидкости. Концентрация углерода в жидкой фазе не изменяется и составляет 0,8%. Кристаллизация сплава начинается при температуре, соответствующей точке  $I$ , и состав первичных кристаллов аустенита определяется точкой пересечения коноды с линией солидус (точка  $I'$ ). При пони-

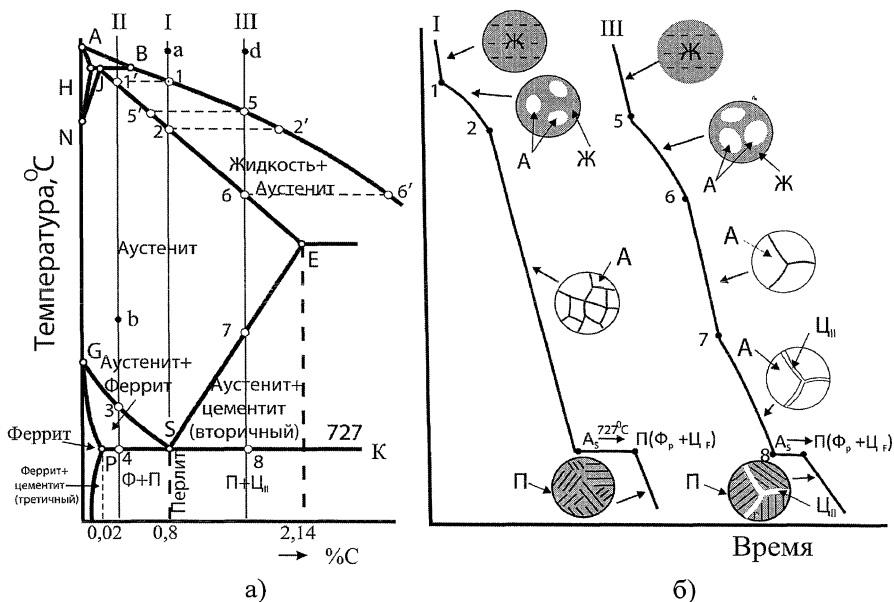


Рис. 6.1. Стальной участок диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C (а) и кривые охлаждения эвтектоидной и заэвтектоидной сталей (б)

жении температуры количеством аустенита возрастает, а его состав меняется в соответствии с линией солидус от точки  $I'$  до точки 2. Состав жид-

кой фазы изменяется в соответствии с линией ликвидус от точки 1 до точки 2'. При температуре точки 2 процесс кристаллизации заканчивается, жидкая фаза исчезает и в сплаве остаётся только аустенит, состав которого отвечает составу самого сплава (0,8%С). От температуры точки 2 до 727°C происходит охлаждение аустенита. При температуре 727°C аустенит, имеющий эвтектоидный состав (точки S) превращается в перлит по эвтектоидной реакции:  $A_S \rightarrow \Pi(\Phi_p + \text{Ц}_к)$ . Дальнейшее понижение температуры ниже линии PSK практически не приводит к изменению структуры и при комнатной температуре структура эвтектоидной стали представляет собой зерна пластинчатого перлита (рис. 6.2).

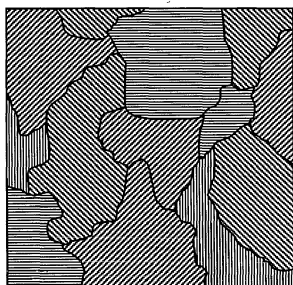


Рис. 6.2. Схема структуры эвтектоидной стали (0,8%С) в равновесном состоянии.  
Структура перлит пластинчатый.

## 2. Довтектоидная сталь (II) (см. рис. 6.1 и рис. 6.3).

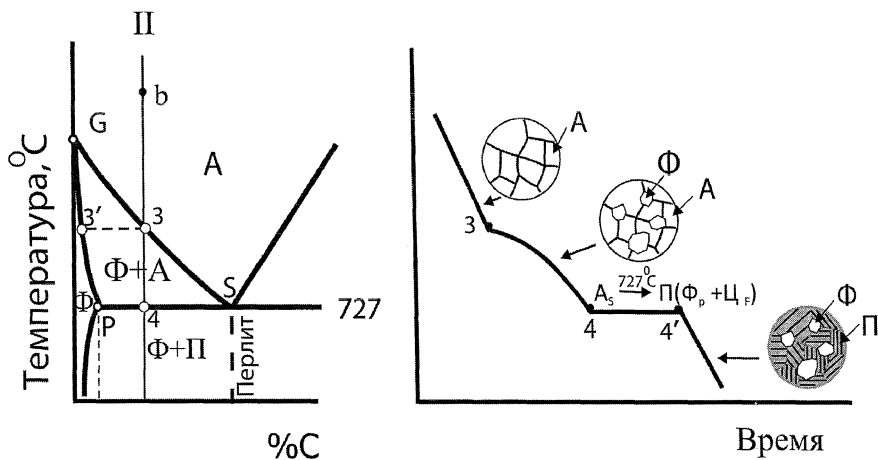
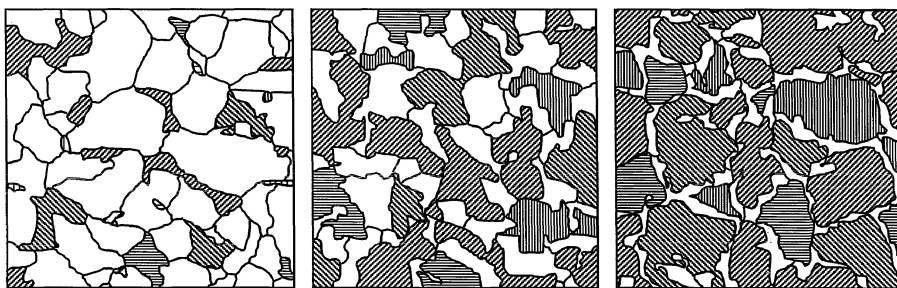


Рис. 6.3. Формирование структуры доэвтектоидной стали

Если доэвтектоидную сталь, нагретую в однофазную аустенитную область (точка b), медленно охлаждать, то до температуры, соответствующей

точке 3 происходит только охлаждение аустенита. Состав аустенита не изменяется и соответствует составу сплава. При переохлаждении ниже точки 3 из аустенита начинает выделяться феррит. Состав первых кристаллов феррита определяется точкой пересечения коноды с линией  $GP$  (точка 3'). При понижении температуры количество феррита возрастает, а его состав меняется от проекции точки 3' до точки  $P$ . При этом аустенит обогащается углеродом и его состав меняется от точки 3 до точки  $S$ . Таким образом при температуре точки 4 сплав состоит из зерен феррита состава точки  $P$ , и аустенита эвтектоидного состава точки  $S$ . При температуре  $727^{\circ}\text{C}$  (линия  $PSK$ ) аустенит с содержанием углерода 0,8% будет претерпевать эвтектоидный распад  $A_S \rightarrow \Pi(\Phi_p + \Pi_k)$  с образованием перлита.

Дальнейшее понижение температуры ниже линии  $PSK$  практически не приводит к изменению структуры. Таким образом, структура доэвтектоидной стали после медленного охлаждения состоит из избыточного феррита и перлита. Чем больше углерода в доэвтектоидной стали, тем больше в ее структуре перлита (рис. 6.4). В сталях с небольшим содержанием углерода, в которых образуется большое количество феррита, эта фаза находится в виде относительно равноосных зёрен (см. рис. 6.4, а, б). В тех случаях, когда количество феррита невелико (например, в стали с содержанием углерода 0,6%), он выявляется в виде светлой оторочки (см. рис. 6.4, в).



а)

б)

в)

Рис. 6.4. Схемы структур доэвтектоидных сталей в равновесном состоянии:  
а) — 0,2%С; б) — 0,4%С; в) — 0,6%С.

Светлые зёрна — феррит; тёмные участки — перлит пластинчатый;

По микроструктуре доэвтектоидной стали после медленного охлаждения можно определить примерное содержание в ней углерода. При этом исходят из предположения, что весь углерод находится в перлите, пренебрегая содержанием в феррите. Тогда зная, что структура стали, содержащей 0,8% углерода состоит из одного перлита (100%), можно определить

сколько примерно углерода в стали со структурой  $\Phi + \Pi(\Phi + \Pi)$ . Если перлита, например 50%, то решая пропорцию:

$$\begin{aligned} 0,8\%C &- 100\% \Pi \\ X\% &- 50\% \Pi, \end{aligned}$$

определяем что  $X$  (содержание углерода в сплаве) = 0,4%С.

### 3. Заэвтектоидная сталь (III) (см. рис. 6.1).

При понижении температуры от точки  $d$  до точки 5 идет простое охлаждение жидкости. При температуре точки 5 начинается кристаллизация аустенита, состав которого изменяется по мере кристаллизации по линии солидус  $5'-6$ . Состав жидкой фазы изменяется в соответствии с линией ликвидус  $5-6'$ . При температуре точки 6 процесс кристаллизации заканчивается с образованием однофазной структуры – аустенита. В интервале температур 6-7 происходит охлаждение аустенита. Ниже точки 7 растворимость углерода в аустените уменьшается и от точки 7 до точки 8 избыточный углерод постепенно выделяется из аустенита в виде цементита. Напомним, цементит, выделяющийся из аустенита, носит название *вторичного*. По мере его образования содержание углерода в аустените уменьшается согласно линии  $ES$  от проекции точки 7 до точки  $S$  (0,8%С). При достижении точки 8 ( $t=727^\circ\text{C}$ ) сталь состоит из вторичного цементита в виде сетки по границам аустенитных зерен, и аустенита эвтектоидного состава. При температуре  $727^\circ\text{C}$  (линия  $PSK$ ) аустенит с содержанием углерода 0,8% будет претерпевать эвтектоидный распад  $A_S \rightarrow \Pi(\Phi_p + \Pi_k)$  с образованием перлита. Структура заэвтектоидной стали после охлаждения до комнатной температуры представляет собой зерна пластинчатого перлита и вторичный цементит в виде светлой сетки (рис. 6.5, а).

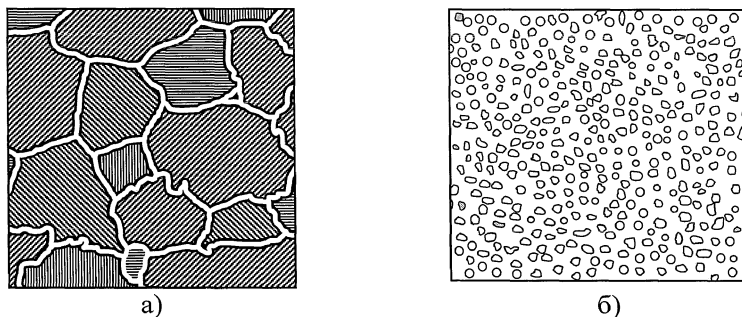


Рис. 6.5. Схемы структур заэвтектоидной стали (1,2%С):

- а) перлит пластинчатый (темные участки) и светлая сетка вторичного цементита; б) зернистый перлит

Чем больше углерода в заэвтектоидной стали, тем в ней больше вторичного цементита. Это приводит к увеличению толщины цементитной сетки. Наличие сетки хрупкого цементита, легко разрушающейся при на-



гружении, обуславливает уменьшение прочности и пластичности заэвтектоидных сталей с увеличением в них содержания углерода. По этой причине заэвтектоидные стали подвергают специальному отжигу, в результате которого получают структуру зернистого перлита (рис. 6.5, б). Зернистый перлит представляет собой феррито-цементитную структуру, в которой основой является феррит, а по его объему равномерно распределены зернистые, близкие к сферическим, включения цементита.

### **6.6. Контрольные вопросы**

1. Какие сплавы называются доэвтектоидными сталями?
2. Какую микроструктуру имеют доэвтектоидные стали после медленного охлаждения при комнатной температуре? Сколько у них фаз и структурных составляющих?
3. Как по микроструктуре доэвтектоидной стали после медленного охлаждения можно определить примерное содержание в ней углерода?
4. Какой сплав называется эвтектоидной сталью? Какую она имеет микроструктуру?
5. Какую микроструктуру имеют заэвтектоидные стали после медленного охлаждения при комнатной температуре? Сколько у них фаз и структурных составляющих?

## **7. СТРУКТУРЫ ЧУГУНОВ**

### **7.1. Цель работы**

Ознакомиться со структурами различных чугунов.

### **7.2. Материал исследования**

Диаграмма состояния железо-цементит и железо-графит. Альбомы с фотографиями микроструктур сталей и коллекция микрошлифов.

### **7.3. Порядок выполнения работы**

1. Рассмотреть процесс кристаллизации и формирование структуры белых чугунов с указанным содержанием углерода. Построить для них кривые охлаждения и в указанных точках определить концентрацию (состав) и количественное соотношение фаз.
2. Ознакомиться со структурами белых чугунов, зарисовать микроструктуры, обозначить структурные составляющие.
3. Вычертить диаграмму железо–графит и указать фазовые области.
4. Ознакомиться со структурами серых, ковких и высокопрочных чугунов до и после травления, зарисовать микроструктуры, обозначить структурные составляющие.

## 7.4. Содержание отчета

Отчет должен включать:

- 1) цель работы;
- 2) диаграмму состояния железо–цементит и железо–графит;
- 3) схематические рисунки микроструктур чугунов.

## 7.5. Методические указания

Напомним, что чугунами называются железоуглеродистые сплавы, содержащие более 2,14%С. В отличие от сталей в чугунах идет эвтектическое превращение.

Углерод в чугуне может находиться в виде цементита или графита, или одновременно в виде цементита и графита. Если весь углерод находится в связанном состоянии, то есть в виде цементита  $\text{Fe}_3\text{C}$ , то такие чугуны называются белыми. В изломе они имеют белый цвет. Они кристаллизуются в соответствии с диаграммой  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  (рис. 7.1,а).

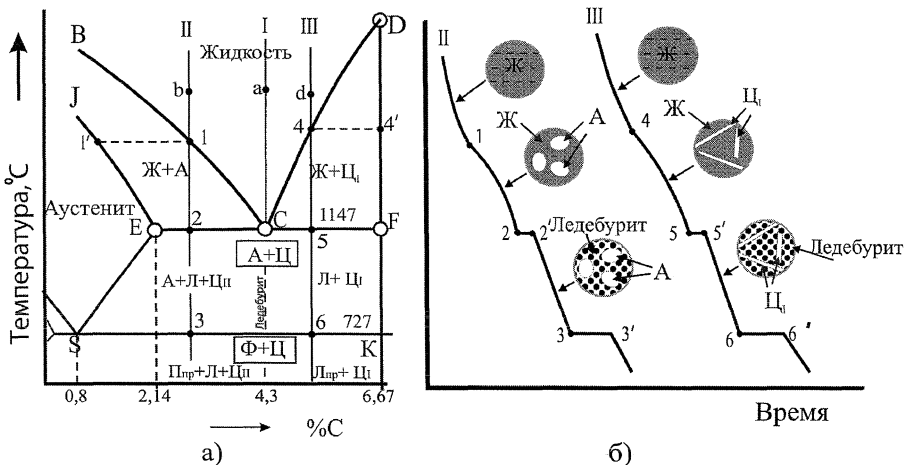


Рис. 7.1. Чугунный участок диаграммы  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  (а) и кривые охлаждения для доэвтектического и заэвтектического чугунов (б)

В зависимости от содержания углерода белые чугуны делятся на три группы: доэвтектические (С от 2,14 до 4,3%) , эвтектический (С=4,3%) и заэвтектические (С>4,3%).

Рассмотрим фазовые превращения в белых чугунах при охлаждении.

1. **Эвтектический чугун** с содержанием С= 4,3% (I) (см. рис. 7.1, а). Кривая охлаждения для указанного сплава приведены на рис. 7.2.

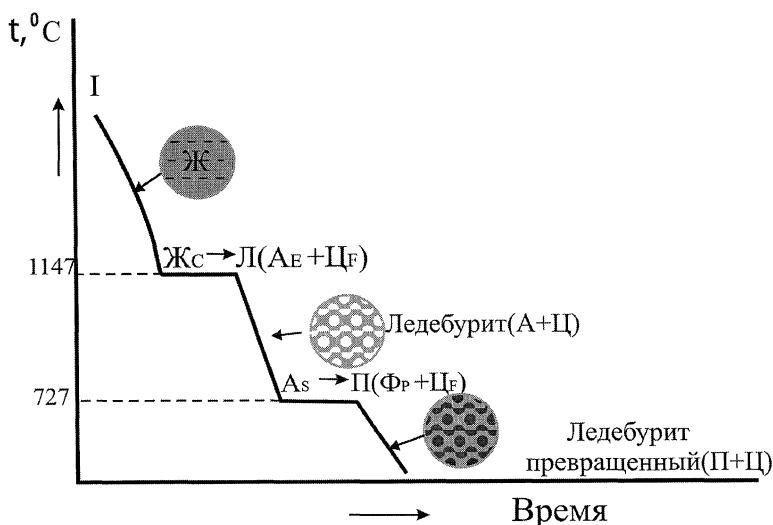


Рис. 7.2. Кривая охлаждения эвтектического чугуна

При охлаждении от температуры точки  $a$  до  $1147^{\circ}\text{C}$  (линия  $ECF$ ) идет простое охлаждение жидкости. Кристаллизация сплава происходит при температуре  $1147^{\circ}\text{C}$ , когда жидкая фаза претерпевает эвтектическое превращение  $\text{Ж}_c \rightarrow \text{А}_e + \text{Ц}_f$  с образованием эвтектической смеси — ледебурита ( $\text{Л}$ ), состоящего из аустенита состава  $E$  и цементита. При последующем снижении температуры от  $1147^{\circ}\text{C}$  до  $727^{\circ}\text{C}$  (линия  $PSK$ ) из аустенита, входящего в состав ледебурита, выделяется цементит вторичный. Этот цементит самостоятельной структурной составляющей не образует. Содержание углерод в аустените меняется от проекции точки  $E$  до точки  $S$ . При температуре  $727^{\circ}\text{C}$  аустенит, входящий в состав ледебурита и обеднённый углеродом до  $0,8\%$ , претерпевает эвтектоидный распад  $\text{А}_s \rightarrow \text{П}(\text{Ф}_p + \text{Ц}_k)$  с образованием перлита, состоящего из феррита и цементита. Ледебурит, аустенит которого испытал эвтектоидный распад, называется *превращённым ледебуритом*. Т.о. выше линии  $PSK$  ледебурит является эвтектической смесью аустенита и цементита, а ниже линии  $PSK$  смесью перлита и цементита (ледебурит превращенный). Структура эвтектического чугуна при комнатной температуре ледебурит превращенный (рис. 7.3, а). Ледебурит обладает высокой твёрдостью и хрупкостью. Его присутствие в структуре чугунов делает их неспособными к обработке давлением.

## 2. Доэвтектический чугун (II) (см. рис. 7.1.)

При понижении температуры от точки  $b$  до точки  $l$  идет простое охлаждение жидкости. При температуре точки  $l$  начинается кристаллизация аустенита, состав которого изменяется с понижением температуры по линии солидус от проекции точки  $l'$  до  $E$ . Состав жидкой фазы изменяется в

соответствии с линией ликвидус  $I-C$ . При температуре  $1147^{\circ}\text{C}$  жидкость, имеющая состав точки  $C$ , претерпевает эвтектическое превращение с образованием ледебурита. Таким образом, структура доэвтектического чугуна при температурах несколько ниже  $1147^{\circ}\text{C}$  будет состоять из участков аустенита и участков ледебурита. Как и в случае чугуна эвтектического состава, при охлаждении между линиями  $ECF$  и  $PSK$  в доэвтектическом чугуне происходит выделение вторичного цементита из аустенита. Содержание углерода в аустените меняется от 2,14% (точка  $E$ ) до 0,8% (точки  $S$ ). При температуре  $727^{\circ}\text{C}$  (точка 3) происходит эвтектоидный распад аустенита  $A_S \rightarrow P(\Phi_p + \Pi_k)$ . При этом бывшие первичные участки аустенита превращаются в перлитные колонии, а аустенит, входящий в состав ледебурита, также претерпевает эвтектоидный распад с образованием перлита. Как было сказано выше, такой ледебурит называется превращённым. В итоге структура доэвтектического чугуна состоит из участков перлита и превращённого ледебурита (см. рис. 7.3, б). При увеличении содержания углерода в доэвтектическом чугуне количество превращённого ледебурита в структуре увеличивается, а перлита — уменьшается.

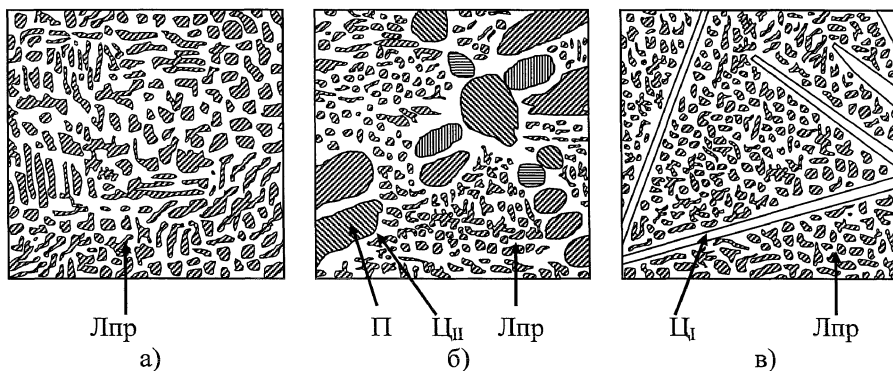


Рис. 7.3. Схемы структур белых чугунов: а) эвтектический; б) доэвтектический; в) заэвтектический

### 3. Заэвтектический чугун (III) (см. рис. 7.1)

В интервале температур от точки  $d$  точки до 4 происходит простое охлаждение жидкой фазы. В процессе охлаждения в температурном интервале между линиями ликвидус  $CD$  и эвтектического превращения  $ECF$  из жидкой фазы выделяется первичный цементит. Концентрация углерода в жидкой фазе меняется от проекции точки 4 до  $C$ . При достижении температуры  $1147^{\circ}\text{C}$  из жидкой фазы состава точки  $C$  образуется ледебурит. Охлаждение от  $1147^{\circ}\text{C}$  до  $727^{\circ}\text{C}$  сопровождается выделением вторичного цементита из входящего в состав ледебурита аустенита, а при  $727^{\circ}\text{C}$  аустенит ледебурита испытывает эвтектоидный распад. После окончания охлажде-

ния структура заэвтектического чугуна состоит из избыточного первичного цементита и превращённого ледобурита. Первичный цементит в такой структуре имеет вид крупных белых пластин (см. рис. 7.3, в). С увеличением содержания углерода в заэвтектическом чугуне количество крупных пластин первичного цементита увеличивается, а превращённого ледобурита — уменьшается.

Если углерод в чугунах частично или полностью содержится в свободном состоянии т.е. в виде графита, чугуны называются серыми. Они имеют излом серого цвета.

Серые чугуны классифицируют по форме графитных включений и строению металлической основы.

Графит неметаллическая фаза, поэтому форму графитных включений удобно оценивать на нетравленных шлифах. По форме графитных включений различают: обычный серый чугун с пластинчатым графитом (рис. 7.4, а), ковкий чугун с хлопьевидным графитом (см. рис. 7.4, б) и высокопрочный чугун с шаровидным графитом (см. рис. 7.4, в).

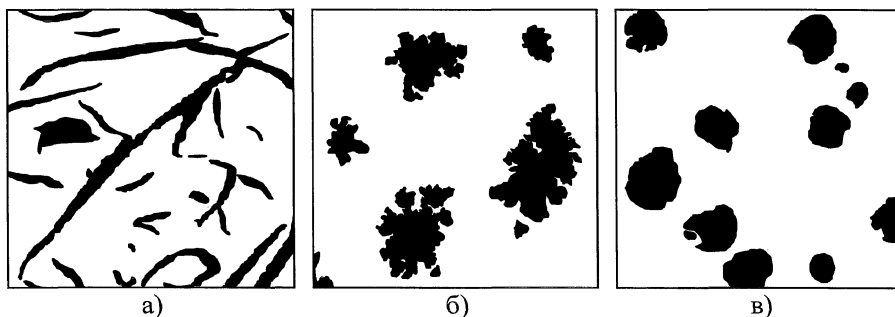


Рис. 7.4. Схемы структур чугунов с различной формой графита: а — серый чугун; б — ковкий чугун; в — высокопрочный чугун

Графит по сравнению с металлической основой имеет ничтожно малую прочность и его включения можно рассматривать как надрезы, нарушающие сплошность металла. Поэтому определяющее влияние на механические свойства чугуна оказывает форма графитных включений: чем она компактнее, тем выше комплекс механических свойств. Наименьшие механические свойства, особенно пластичность, имеет серый чугун.

По строению металлической основы различают чугуны на ферритной основе (структура феррит + графит), феррито-перлитной (структура феррит + перлит + графит) и перлитной (структура перлит + графит) (рис. 7.5).

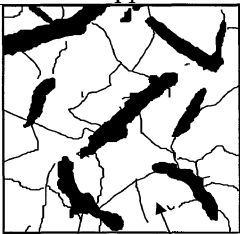
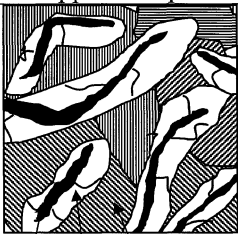
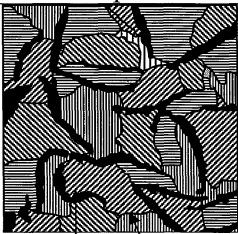
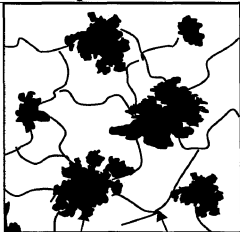

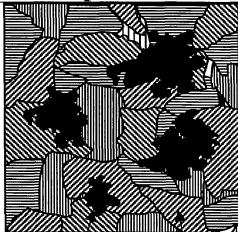
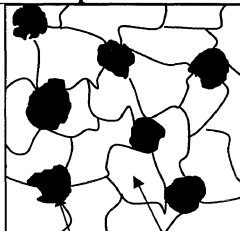
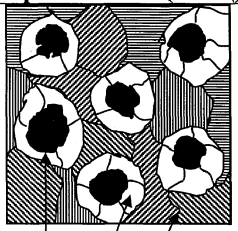
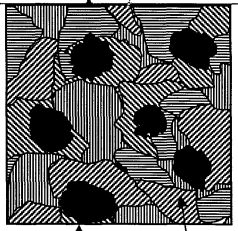
Вид чугуна	Структура металлической основы чугуна		
	Феррит	Феррит + перлит	Перлит
Серый (СЧ)	 Гр Ф	 Гр Ф П(Ф+П)	 Гр П
Ковкий (КЧ)	 Гр Ф	 Гр Ф П(Ф+П)	 Гр П
Высокопрочный (ВЧ)	 Гр Ф	 Гр Ф П(Ф+П)	 Гр П

Рис. 7.5. Схемы структур чугунов после травления:

Общее содержание углерода ( $C_{\text{общ}}$ ) в этих чугунах складывается из углерода в виде цементита ( $C_{\text{связ}}$ ) и в виде графита ( $C_{\text{своб}}$ ):

$$C_{\text{общ}} = C_{\text{связ}} + C_{\text{своб}}$$

Если  $C_{\text{связ}} = 0$ , то чугун будет иметь ферритную металлическую основу (считаем, что весь углерод находится в свободном состоянии в виде графита). Если  $C_{\text{связ}} = 0,8\%$ , то металлическая основа чугуна – перлит. Если  $0 < C_{\text{связ}} < 0,8\%$ , то металлическая основа чугуна феррито-перлитная.

Прочность и твёрдость чугунов растут при увеличении количества перлита в металлической основе.

### 7.6. Контрольные вопросы

1. Какие сплавы называются доэвтектическими, эвтектическими и заэвтектическими белыми чугунами? Какую они имеют структуру при комнатной температуре? Сколько фаз и структурных составляющих в них?
2. Какое превращение происходит на линии ECF диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C?
3. Какое превращение происходит на линии PSK диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C?
4. Чем отличаются между собой серый, ковкий и высокопрочный чугуны?
5. Какую форму имеют графитные включения в сером, ковком, высокопрочном чугунах?
6. Какую структуру металлической основы могут иметь серый, ковкий и высокопрочные чугуны?

## 8. МАРКИРОВКА СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ

### 8.1. Цель работы

Изучить принципы маркировки сплавов на основе железа и научиться распознавать материал по его марке.

### 8.2. Порядок работы

1. Самостоятельно изучить классификации сталей по химическому составу, назначению и т.д., принципы маркировки сталей и чугунов.
2. Получить у преподавателя индивидуальное задание и выполнить его. В первой части задания необходимо расшифровать маркировки определенных сплавов, указав их назначение и химический состав. Во второй части по приведенному химическому составу зашифровать сталь.

### 8.3. Методические указания

Помимо Fe и C, любая сталь содержит примеси. Их делят на:

1) *постоянные*:

— *кремний* (до 0,4 %) и *марганец* (до 0,8 %), вводимые в сталь при выплавке для раскисления (удаления кислорода).

— *сера* и *фосфор*, которые являются вредными примесями. Сера придаёт стали красноломкость, то есть склонность к разрушению при горячей деформации из-за образования легкоплавкой (988°C) эвтектики по границам зёрен. Фосфор, растворяясь в феррите, значительно повышает порог хладноломкости стали. Содержание S и P является одним из основных параметров, определяющих качество стали;

2) *скрытые*, под которыми понимают растворённые в стали газы (кислород, азот, водород). Они также ухудшают свойства стали и являются вредными; обычно их содержание не превышает 0,01 %;

3) *случайные* — любые другие элементы, которые могут попадать в сталь при выплавке (Cr, Ni, Cu, Sb, Bi и др.).

Кроме того, в некоторые стали для изменения их свойств специально вводят те или иные *легирующие элементы*. В качестве легирующих могут выступать и те элементы, которые обычно считаются примесями (Si, Mn, N), если они вводятся намеренно и их содержание превышает обычный уровень. Стали, содержащие лишь Fe, C и примеси, называются *углеродистыми*, а стали, в которых дополнительно присутствуют легирующие элементы — *легированными*.

Стали классифицируют по различным признакам.

1. По *химическому составу* стали делят на углеродистые и легированные.

По содержанию углерода те и другие подразделяют на:

- низкоуглеродистые (менее 0,3%С);
- среднеуглеродистые (0,3...0,7%С);
- высокоуглеродистые (более 0,7%С).

По суммарному количеству легирующих элементов различают стали:

- низколегированные (количество легирующих элементов не превышает 5%);
- среднелегированные (5...10%);
- высоколегированные (более 10%).

2. По *назначению* стали делят на три основных группы:

- *конструкционные*, предназначенные для изготовления конструкций, деталей машин и приборов;
- *инструментальные*, из которых изготавливают режущий и измерительный инструмент, а также инструмент для холодного и горячего деформирования;
- *стали с особыми свойствами*, обладающие специфическими магнитными, электрическими и другими характеристиками.

3. По *качеству*, что определяется в первую очередь содержанием в сталях вредных примесей серы и фосфора, стали подразделяются:

- *обыкновенного качества* (содержат до 0,050%S и до 0,040%P);
- *качественные* (S и P не более 0,035% каждого);
- *высококачественные* (не более 0,025%S и 0,025%P);
- *особо высококачественные* (не более 0,015%S и 0,025%P).

4. По *степени раскисления* стали делятся на спокойные, полуспокойные и кипящие. *Спокойные* стали раскисляют марганцем, кремнием и алюминием. Они содержат мало кислорода и затвердевают спокойно, без выделения газов. *Кипящие* стали раскисляют только марганцем. В них содержится повышенное количество кислорода, который при затвердевании стали час-



тично взаимодействует с растворённым в ней углеродом и удаляется в виде окиси углерода CO. Бурное выделение пузырьков CO создаёт впечатление «кипения» стали, с чем и связано название «кипящая». Кипящая сталь дешевле спокойной, но имеет более высокий порог хладноломкости. *Полуспокойные* стали занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими. Их раскисляют марганцем и небольшим количеством кремния.

В каждой стране существует своя система обозначения углеродистых и легированных сталей. Ниже рассмотрены принципы маркировки сталей по стандартам России. Как правило, марка стали указывает её примерный химический состав. Здесь рассмотрена маркировка только обычных конструкционных и инструментальных сталей. Маркировка сталей специального назначения (рельсовых, судостроительных, трансформаторных, магнитных и т.п.) не рассматривается.

### 8.3.1. Маркировка конструкционных сталей

#### Стали обыкновенного качества (ГОСТ 380-94)

Стали обыкновенного качества выпускаются только углеродистые. Они содержат  $\leq 0,050\% S$ ,  $\leq 0,040\% P$ .

Маркировка: буквы «Ст» + цифра от 1 до 6 (порядковый номер) + буквы «кп», «пс» или «сп», означающие степень раскисления:

«кп» — кипящая сталь ( $\leq 0,05\% Si$ );

«пс» — полуспокойная ( $0,05 \dots 0,15\% Si$ );

«сп» — спокойная ( $0,15 \dots 0,30\% Si$ ).

Цифра в марке указывает номер стали по ГОСТу. Чем выше номер, тем в стали больше %C. Средний процент углерода в сталях обыкновенного качества в качестве примера приведен в табл. 9.1.

Таблица 8.1

Сталь	Средний %C	Сталь	Сред- ний %C
Ст0*	$\leq 0,23$		
Ст1	0,09	Ст4	0,22
Ст2	0,12	Ст5	0,32
Ст3	0,18	Ст6	0,44

\* Ст0 — сталь самого низкого качества ( $\leq 0,060\% S$ ,  $\leq 0,070\% P$ ).

*Примеры:*

Ст1кп

Ст2пс

Ст6сп

Ст3 — степень раскисления не указана

СтЗГпс — буква Г указывает на повышенное содержание марганца (~1 %Mn)

### Качественные стали

#### а) Качественные углеродистые стали (ГОСТ 1050-88)

Содержат  $\leq 0,040$  %S,  $\leq 0,035$  %P.

Маркировка: две цифры, указывающие среднее содержание углерода в сотых долях процента.

В конце марки может указываться степень раскисления: «кп» или «пс». Буквы «сп» не указываются, так как качественные стали чаще всего выплавляются спокойными.

Примеры:

08кп — 0,08 %C, кипящая;	30 — 0,30 %C;
08 — 0,08 %C, спокойная;	45 — 0,45 %C;
20 — 0,20 %C;	60 — 0,60 %C.

#### б) Легированные стали (ГОСТ 4543-71, 5632-72, 14959-79 и др.)

Обычно содержат  $\leq 0,035$  %S,  $\leq 0,035$  %P.

Маркировка:

1) вначале — две (редко три) цифры, указывающие среднее содержание углерода в сотых долях процента;

2) затем — буквы, указывающие легирующие элементы:

А — азот (N);	Н — никель (Ni);
Б — ниобий (Nb);	Р — бор (B);
В — вольфрам (W);	С — кремний (Si);
Г — марганец (Mn);	Т — титан (Ti);
Д — медь (Cu);	Ф — ванадий (V);
К — кобальт (Co);	Х — хром (Cr);
М — молибден (Mo);	Ю — алюминий (Al).

Очень редко встречаются также следующие обозначения:

Е — селен (Se);	Ц — цирконий (Zr);
П — фосфор (P);	ч — редкоземельные элементы (Ce и др.).

После каждой буквы стоит цифра, указывающая среднее содержание соответствующего элемента в целых процентах. Если содержание элемента  $\leq 1...1,5$  %, то цифра не ставится;

3) в конце марки могут добавляться дополнительные буквы:

А — высококачественная сталь ( $\leq 0,025$  %S,  $\leq 0,025$  %P);

-Ш — особовысококачественная сталь, подвергнутая ЭШП — электрошлаковому переплаву ( $\leq 0,015$  %S,  $\leq 0,025$  %P);

-ВД — подвергнутая ВДП — вакуумно-дуговому переплаву;

Л — литейная сталь (предназначенная для изготовления отливок и не подвергающаяся горячей деформации).

Так же маркируются и высоколегированные стали специального назначения (коррозионностойкие, жаропрочные и др.).

*Примеры:*

15Х — 0,15 %С; 1 %Cr;

09Г2С — 0,09 %С; 1,5 %Mn; 0,6 %Si;

40ХФА — 0,4 %С; 1 %Cr; 0,15 %V; высококачественная;

20ХГНТР — 0,2 %С; 0,5 %Cr; 1 %Mn; 0,5 %Ni; 0,05 %Ti; 0,005 %B;

12Х1МФ — ≤0,12 %С; 1 %Cr; 0,3 %Mo; 0,2 %V;

20Л — 0,2 %С; литейная;

110Г13Л — 1,1 %С; 13 %Mn; литейная;

95Х18-Ш — 0,95 %С; 18 %Cr; подвергнута ЭШП;

30ХГСА-ВД — 0,30 %С; 1 %Cr; 1 %Mn; 1 %Si; подвергнута ВДП;

38ХНЗМФА — 0,38 %С; 1,3 %Cr; 3 %Ni; 0,4 %Mo; 0,15 %V; высококачественная;

08Х18Н12Б — ≤0,08 %С; 18 %Cr; 12 %Ni; 1 %Nb.

### **в) Подшипниковые стали (ГОСТ 801-78)**

Маркировка: буквы «ШХ» (Ш — шарикоподшипниковая, Х — хромистая) + содержание хрома в *десятих* долях процента + обозначение других легирующих элементов, если они есть. Содержание углерода в этих сталях составляет ~1 % и в марке не указывается.

*Примеры:*

ШХ4 — 1 %С; 0,4 %Cr;

ШХ15 — 1 %С; 1,5 %Cr;

ШХ15СГ — 1 %С; 1,5 %Cr; 0,5 %Si; 1 %Mn;

ШХ15-Ш — 1 %С; 1,5 %Cr; подвергнута ЭШП.

### **г) Автоматные стали (стали повышенной обрабатываемости резанием; ГОСТ 1414-75 и др.)**

Повышенная обрабатываемость резанием достигается за счёт облегчения отделения стружки. Для этого либо повышают содержание в стали серы и фосфора (в обычных сталях считающихся вредными примесями), либо присаживают к ней небольшое количество селена или кальция, либо легируют её легкоплавкими металлами — свинцом или висмутом.

Автоматные стали маркируются как обыкновенные углеродистые или легированные стали, но в начале марки добавляются буквы, обозначающие:

А — сталь с повышенным содержанием S (до 0,25%) и P (до 0,15%);

АС — сталь, легированная Pb (до 0,3 %);

АВ — сталь, легированная Вi (до 0,2 %);  
АЦ — сталь, легированная Са (до 0,01 %).

*Примеры:*

А20 — 0,2 %С; с повышенным содержанием S и P;  
АС14 — 0,14 %С; легирована Pb;  
АС40Х — 0,4 %С; 1 %Cr; легирована Pb;  
АВ19ХГН — 0,19 %С; 1 %Cr; 1 %Mn; 1 %Ni; легирована Вi;  
АЦ20 — 0,2 %С; легирована Са.

#### **д) Нестандартные высоколегированные стали и сплавы**

Ещё не вошедшие в ГОСТы стали и сплавы иногда обозначают по порядковому номеру освоения на металлургическом заводе. Перед номером ставится условное обозначение завода: «ЭИ», «ЭП», «ДИ», «ЗИ», «ЧС» и др. После включения данной стали в стандарты такое обозначение заменяют на обычное.

*Например:*

ЭИ402 = 08Х18Н12Б	ДИ13 = 10Х14АГ15
ЭИ268 = 14Х17Н2	ЗИ130 = 03Х24Н6МЗ
ЭП53 = 02Х22Н6Т	ЧС36 = 03Х13АГ19

### **8.3.2. Маркировка инструментальных сталей**

#### **а) Углеродистые (ГОСТ 1435-90)**

Маркировка: ставится буква «У» («углеродистая») + цифры, указывающие содержание углерода в *десятых* долях процента.

*Примеры:*

У7 — 0,7 %С;  
У10 — 1,0 %С;  
У13 — 1,3 %С;  
У12А — 1,2 %С, высококачественная;  
У8ГА — 0,8 %С, с повышенным содержанием Mn, высококачественная.

#### **б) Легированные (ГОСТ 5950-73)**

В начале марки — одна цифра, указывающая среднее содержание углерода в *десятых* долях процента. Если углерода содержится  $\geq 1$  %, то никакой цифры не ставится. Затем указываются легирующие элементы, как у конструкционных сталей.

*Примеры:*

9ХС — 0,9 %С; 1 %Cr; 1 %Si;  
7ХЗ — 0,7 %С; 3,5 %Cr;  
4ХВ2С — 0,4 %С; 1 %Cr; 2 %W; 1 %Si;  
Х — 1 %С; 1,5 %Cr (ср. сталь ШХ15);

ХВГ — 1 %С; 1 %Cr; 1,4 %W; 1 %Mn;

Х12 — 2,1 %С; 12 %Cr;

Х12Ф1 — 1,4 %С; 12 %Cr; 0,8 %V.

### **в) Быстрорежущие (ГОСТ 19265-73)**

Основное свойство быстрорежущих сталей — способность сохранять высокую твёрдость при разогреве инструмента до температур 550...600 °С — обеспечивается за счёт легирования W или Mo.

Маркировка: буква «Р» + содержание вольфрама в *целых* процентах + прочие легирующие элементы.

Все быстрорежущие стали содержат 0,7...1,0 %С; ~4 %Cr; ~1 %V; эти элементы в марке не указываются.

*Примеры:*

Р18 — 18 %W; а также 0,7 %С; 4 %Cr; 1 %V;

Р6М5 — 6 %W, 5 %Mo; а также 0,8 %С; 4%Cr; 2 %V;

Р18К5Ф2 — 18 %W; 5 %Co; 2 %V; а также 0,9 %С; 4 %Cr.

*При разборе маркировок сталей обратите внимание на следующее.*

1. Отсутствие цифры после обозначения легирующего элемента во многих случаях означает не «1 %», а «<1 %». Например, такие элементы, как V, Ti, Nb, а также N обычно вводятся в количестве не более 0,1...0,2 %; Mo в количестве 0,2...0,4 %; В — 0,001...0,005 % (!). Примеры см. выше.

2. Обозначение содержания углерода у конструкционных сталей даётся в *сотых* долях процента и всегда состоит не менее чем из двух цифр, а у инструментальных — в *десятых* долях процента и всегда состоит из одной цифры. Сравните, например: 09Г2С (0,09 %С), 9ХС (0,9 %С) и 90ХФ (0,9 %С).

3. Значение буквы «А» зависит от её положения:

— в начале марки она означает, что сталь автоматная (А11, АС40);

— в середине марки — что сталь легирована азотом (14Г2АФ);

— в конце марки — что сталь высококачественная (40ХФА, 30ХГСА).

4. Кремний и марганец не всегда отображаются в маркировке, хотя всегда присутствуют в стали. Если они вводятся только для раскисления (обычно 0,5...0,8 %Mn и 0,2...0,4 %Si), то считаются примесями и в марку не включаются. Если их содержание больше, то они считаются легирующими элементами и указываются в маркировке. Сравни, например, сталь 30Х (~0,3 %С; ~1 %Cr; ~0,3 %Si; ~0,6 %Mn) и сталь 30ХГС (~0,3 %С; ~1 %Cr; ~1 %Mn; ~1 %Si).

5. Содержание серы и фосфора также влияет на маркировку. Сравните, например, стали 30ХГС ( $\leq 0,035$  %S;  $\leq 0,035$  %P), 30ХГСА ( $\leq 0,025$  %S;  $\leq 0,025$  %P) и 30ХГСА-Ш ( $\leq 0,015$  %S;  $\leq 0,025$  %P).

### 8.3.3. Маркировка чугунов

Серые чугуны (ГОСТ 1412-85) маркируются буквами СЧ, после которых указывается минимальный гарантируемый предел прочности при растяжении в  $\text{кг/мм}^2$  ( $1\text{кг/мм}^2 \approx 10\text{МПа}$ ):

СЧ 10 — серый чугун с  $\sigma_b \geq 100\text{ МПа}$ ;

СЧ 35 — серый чугун с  $\sigma_b \geq 350\text{ МПа}$ .

Высокопрочные чугуны (ГОСТ 7293-85) — так же, но пишется ВЧ:

ВЧ 35 — высокопрочный чугун с  $\sigma_b \geq 350\text{ МПа}$ ;

ВЧ 100 — высокопрочный чугун с  $\sigma_b \geq 1000\text{ МПа}$ .

Ковкие чугуны (ГОСТ 1215-79) — буквами КЧ, после которых указываются минимальные значения предела прочности и относительного удлинения при растяжении:

КЧ 37-12 — ковкий чугун с  $\sigma_b \geq 370\text{ МПа}$  и  $\delta \geq 12\%$ ;

КЧ 65-3 — ковкий чугун с  $\sigma_b \geq 650\text{ МПа}$  и  $\delta \geq 3\%$ .

Антифрикционные чугуны (ГОСТ 1585-85) маркируются буквами АЧ, после которых указывается тип чугуна (С, В или К) и условный номер марки. Их состав и свойства можно узнать лишь из ГОСТа или справочника. Примеры:

АЧС-3 — антифрикционный серый чугун;

АЧВ-1 — антифрикционный высокопрочный чугун;

АЧК-2 — антифрикционный ковкий чугун.

### 8.4. Задания для самостоятельной работы

#### Пример выполнения заданий

*Задание 1. Расшифровать марки.*

Ст2кп — сталь обыкновенного качества, кипящая.

40ХФА — 0,4 %С; 1 %Cr;  $\leq 1\%$  V; высококачественная.

АС45Г2 — автоматная сталь: 0,45 %С; 2 %Mn; легирована Pb.

P18 — быстрорежущая сталь; 18 %W.

СЧ21 — серый чугун;  $\sigma_b \geq 21\text{ кгс/мм}^2$ .

ХВ5 — инструментальная сталь:  $\geq 1\%$  С; 1 %Cr; 5 %W.

ШХ15 — подшипниковая сталь: 1 %С; 1,5 %Cr.

*Задание 2. Написать марки.*

0,40%С; 1,0%Cr; 0,25%Si; 0,65%Mn; 0,025%S; 0,025%P — сталь 40ХА.

**Примеры задания № 1 по расшифровке марки сталей и чугунов.**

Вар-т	Марки
1	70; У9А; Ст2пс; КЧ 80-1,5; Р6М3; ХВ5; АВ40Х; ШХ4-Ш; 4Х2МНФ; 40Г2; 16Х18Н12С4ТЮЛ; 27ХГР

Вар-т	Марки
2	04Х3Г2; ХВ4Ф; 12Х25Н5ТМФЛ; 20ХМ; КЧ 35-10; ШХ9; АЦ20ХГНМ; У8А; 9ХФМ; Ст1кп; Р6М5К5; 20пс
3	СЧ21; ХВСГ; ШХ15-ВД; 20кп; 16Г2САФ; Р3М3Ф2; 25Х13Н2; 12ДХН1МФЛ; АС40ХГНМ; 2Х5В5М2К5; У8; Ст2кп
4	30Х13Н7С2; 16ХСН; АЦ18ХН2Т; У10; Ст6сп; СЧ20; ШХ15-ВД; 4ХМНФС; 30ХГСН2А; 75; Х6ВФ; Р9Ф5
5	У13А; ШХ15СГ; 20Р; ВЧ50; Х12МФ; 10ГС2; АЦ40; 10кп; Р9М4К8Ф; 5ХНВ; Ст4; 20Г2
6	Ст3Гпс; ХГС; СЧ25; ШХ10; 4ХС; Р8М3К6С; 15Х28; 40; 30ХЛ; АС40; 55Х20Г9АН4; У7А
7	У8; Х12М; 3Х2В8Ф; 50Х; Ст2; Р18Ф2; 20Х13Н13; ШХ20СГ; 10пс; АЦ40Х; 06Х15Н6МВФБ-Ш; ВЧ 60

**Примеры задания № 2** по зашифровке стали, имеющей указанный состав.

Вар-т	Состав
1	0,55%С; 0,25 %Si; 0,6 %Mn; 0,040 %S; 0,035 %P
2	0,08%С; 18,0%Cr; 12,0%Ni; 1,0%Nb
3	1,1%С; 6,0%Cr; 1,3%W; 0,6%V; 0,25%Si; 0,3%Mn; 0,030%S; 0,030%P
4	0,36 %С; 1,5 %Cr; 1,5 %Ni; 0,35 %Mo; 0,15 %V; 0,25 %Si; 0,4 %Mn; 0,025 %S; 0,025 %P
5	0,08 %С; 13,0 %Cr; 0,8 %Si; 0,8 %Mn; 0,025 %S; 0,030 %P
6	0,10 %С; 1,5 %Mn; 0,04 %Nb; 0,25 %Cu; 0,25 %Si; 0,040 %S; 0,035 %P
7	0,45 %С; 1,8 %Mn; 0,25 %Si; 0,035 %S; 0,035 %P

## 9. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Свойства стали определенного состава можно менять в широком интервале путем проведения термической обработки. Термической обработкой называется совокупность операций нагрева сплавов до определенной

температуры, выдержки при этой температуре и охлаждении с заданной скоростью с целью изменения их структуры и получения необходимых свойств. Для качественного проведения термообработки и получения нужных свойств важно правильно выбрать температуру нагрева и скорость охлаждения.

### 9.1. Цель работы

Выяснить влияние скорости охлаждения на структуру и твердость углеродистой доэвтектоидной стали.

### 9.2. Материал исследования

Образцы углеродистых сталей 20, 30, 45, 60.

Химический состав (ГОСТ 1050-88) и критические точки этих сталей приведены в таблице 9.1.

Таблица 9.1

Марка стали	Химический состав, % вес					Критические точки, °C	
	C	Si	Mn	S не более	P не более	A <sub>C1</sub>	A <sub>C3</sub>
20	0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	0,04	0,035	735	850
30	0,27–0,35	0,17–0,37	0,5–0,8	0,04	0,035	730	813
45	0,42–0,50	0,17–0,37	0,5–0,8	0,04	0,035	730	770
60	0,57–0,65	0,17–0,37	0,5–0,8	0,04	0,035	725	750

### 9.3. Порядок выполнения работы

1. Выписать химический состав и критические точки сталей.
2. Выбрать температуру нагрева и время выдержки для аустенитизации образцов:  $t_n = A_{C3} + (30 \div 50)^\circ\text{C}$ ;  $\tau_{\text{выд}} = 1,5$  мин на 1 мм сечения образца.
3. Провести аустенитизацию образцов с последующим охлаждением:
  - а) с печью;
  - б) на воздухе;
  - в) в масле;
  - г) в воде;
  - д) в соленой воде (10%-ный раствор NaCl в воде).
4. Заточить образцы на наждаке и измерить их твердость. После охлаждения на воздухе и с печью твердость измеряют на приборе Роквелла по



шкале «В» (стальным шариком при нагрузке 100 кг), а после охлаждения в масле, воде и соленой воде - по шкале «С» (алмазным конусом, при нагрузке 150 кг). Чтобы сравнить числа твердости, их переводят в единицы твердости Бринелля (НВ).

5. Приготовить микрошлифы, протравить и зарисовать микроструктуры.

6. Полученные данные привести в табл. 9.3.

7. По приведенным диаграммам изотермического распада переохлажденного аустенита (приложение) определить  $V_{\text{вкз}}$  и  $V_{\text{нкз}}$  для сталей 35 и 45.

8. Сравнить рассчитанные скорости с реальными скоростями охлаждения в различных средах (табл. 9.2).

Таблица 9.2

Закаливающая среда	Скорость охлаждения °/с в интервале температур	
	550–650°	200–300°
Вода при 18°	600	270
Вода при 25°	500	270
Вода при 50°	100	270
Вода при 74°	30	200
10% раствор NaOH в воде	1200	300
10% раствор NaCl в воде	1100	300
Эмульсия масла в воде	70	200
Минеральное машинное масло	100	15–18

9. Сделать вывод о влиянии скорости охлаждения на твердость и микроструктуру углеродистой доэвтектоидной стали.

#### 9.4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

- 1) Наименование и цель работы;
- 2) материал исследования;
- 3) порядок выполнения работы;
- 4) химический состав исследуемых сталей, и их критические точки
- 5) схематические рисунки микроструктур сталей, охлажденных с различными скоростями;
- 8) расчеты  $V_{\text{вкз}}$  и  $V_{\text{нкз}}$  для сталей и их сравнения с охлаждающей способностью различных сред
- 6) таблицу с полученными результатами;
- 9) выводы по работе.

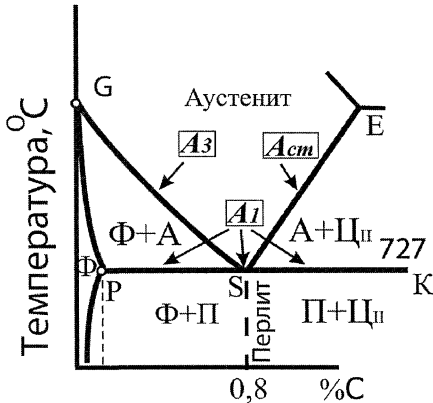
Таблица 9.3

Марка стали	Температура аустенизации, °C	Время выдержки, мин	Охлаждающая среда	Скорость охл. °/с	Твердость			Микроструктура	Наименование операции термобработки
					HRC	HRB	HB		
20			печь						
			воздух						
			масло						
			вода						
			соленая вода						
30			печь						
			воздух						
			масло						
			вода						
			соленая вода						
45			печь						
			воздух						
			масло						
			вода						
			соленая вода						
60			печь						
			воздух						
			масло						
			вода						
			соленая вода						

## 9.5. Методические указания

При различных видах термической обработки температура нагрева выбирается с учетом критических точек. Для сталей различают следующие критические точки:

Точка  $A_1$  (линия PSK) — температура превращения аустенит ↔ перлит.



Точка  $A_3$  (линия GS) — превращение аустенит ↔ феррит. Температура начала выделения феррита из аустенита при медленном охлаждении или окончания растворения феррита в аустените при медленном нагреве.

Точка  $A_{cm}$  (линия ES) — превращение аустенит ↔ цементит вторичный. Температура начала выделения вторичного цементита из аустенита при медленном охлаждении или окончания растворения цементита в аустените при медленном нагреве.

Рис. 9.1. Критические точки стали на диаграмме Fe–Fe<sub>3</sub>C

Указанные критические точки имеют разное значение при нагреве и охлаждении. Обозначения критических точек, определённых при нагреве, имеют дополнительный индекс «с», а при охлаждении — «г»:  $A_{c1}$  и  $A_{r1}$ ,  $A_{c3}$  и  $A_{r3}$ .

Эвтектоидная сталь имеет одну критическую точку —  $A_1$ . Дозэвтектоидные стали две:  $A_1$  и  $A_3$ . Заэвтектоидные также две:  $A_1$  и  $A_{cm}$ .

При термообработке стали часто нагревают до получения аустенита. В равновесных условиях аустенит может существовать лишь выше линии PSK (727°C). Однако быстрым охлаждением его можно сохранить какое-то время и ниже этой температуры. Такой аустенит называют переохлажденным, он неравновесный, неустойчивый. С течением времени происходит распад, который при постоянной температуре описывается диаграммами изотермического распада переохлажденного аустенита (С-образными диаграммами). На рис. 9.2 приведена С-образная диаграмма для эвтектоидной углеродистой стали (схема).

Перлитная область в углеродистых сталях занимает интервал температур от  $A_1$  до 500÷550°C. Здесь происходит диффузионный распад аустенита на феррито-карбидные структуры (ФКС). Превращение начинается по истечении инкубационного периода  $\tau_{инк}$ , т.е. какое-то время существует переохлажденный аустенит.

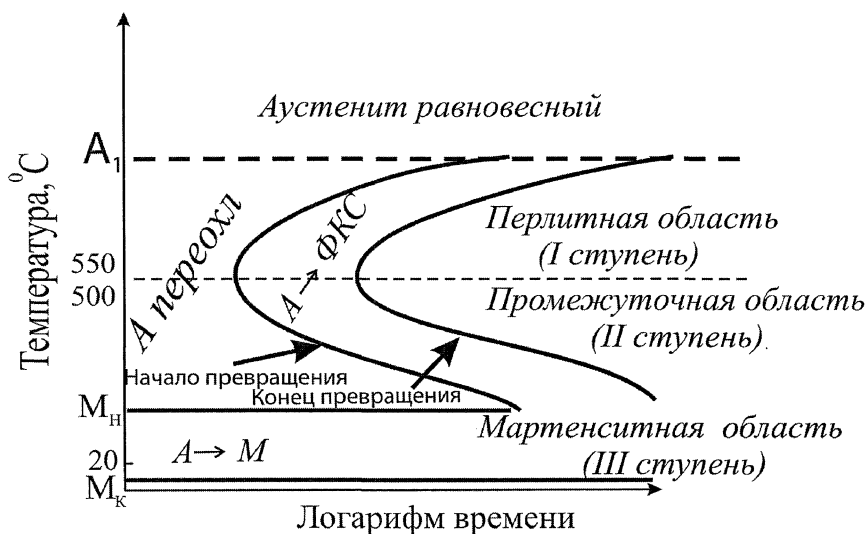


Рис. 9.2. Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита для эвтектоидной углеродистой стали (схема)

Продукты превращения в перлитной области имеют пластинчатое строение. Чем ниже температура, при которой происходит распад аустенита, тем меньше суммарная толщина пластинок феррита и цементита, следовательно тоньше, дисперснее получается ФКС.

По степени дисперсности условно различают перлит, сорбит и троостит. Схематично эти структуры показаны на рис. 9.3. С увеличением степени дисперсности ФКС возрастает ее твердость (табл. 9.4)

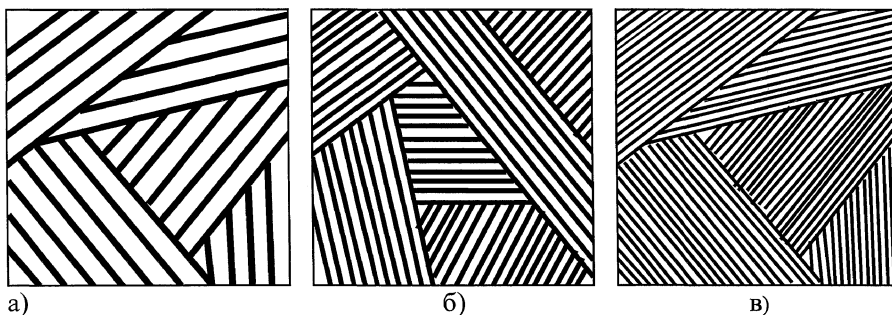


Рис. 9.3. Схемы микроструктур: а) перлита; б) сорбита; в) троостита

Таблица 9.4

Структура	Перлит (П)	Сорбит (С)	Троостит (Т)
Величина меж- пластинчатого расстояния, мкм	0,6÷1,0	0,25÷0,30	0,10÷0,15
НВ, МПа	1800÷2500	2500÷3500	3500÷4500

Таким образом перлит, сорбит и троостит, образующиеся при распаде переохлажденного аустенита, имеют одинаковую природу (это все ФКС) и различаются лишь степенью дисперсности. Промежуточная область находится в интервале температур от  $(\sim 550 \div 500)^{\circ}\text{C}$  до  $M_n$  (см. рис. 9.2). Это превращение имеет общие черты как с диффузионным (перлитным), так и бездиффузионным (мартенситным). Образующаяся структура – бейнит, который представляет собой несколько пересыщенный углеродом  $\alpha$ - твердый раствор и карбиды. Верхний бейнит образуется в интервале  $550 \div 450^{\circ}\text{C}$ , а нижний – в интервале  $\sim 450^{\circ}\text{C} \div M_n$ . Бейнитная структура характеризуется большей прочностью, чем продукты диффузионного превращения переохлажденного аустенита. Наиболее высокий уровень механических свойств имеет нижний бейнит.

Мартенситная область расположена в интервале температур  $M_n \div M_k$ . Превращение аустенита в этой области носит бездиффузионный характер (при низких температурах диффузионные процессы заторможены) и заключается лишь в перестройке кристаллической решетки  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Химический состав мартенсита остаётся таким же, как у исходного аустенита. При комнатной температуре растворимость углерода в  $\alpha$ -железе чрезвычайно мала. Поэтому мартенсит – пересыщенный, принудительный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -Fe.

Он имеет тетрагональную объемно-центрированную кристаллическую решетку и обладает высокой твердостью. Уровень твердости возрастает с увеличением содержания углерода в мартенсите. В то же время мартенсит характеризуется высокой склонностью к хрупкому разрушению.

Диаграммы изотермического превращения аустенита для доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей имеют несколько иной вид: появляются дополнительные линии, соответствующие началу образования избыточного феррита или цементита соответственно (рис. 9.5).

В практике термообработки чаще приходится иметь дело с непрерывным охлаждением. О превращениях, происходящих в условиях непрерывного понижения температуры, в первом приближении можно судить, если на диаграмму изотермического распада аустенита нанести скорости охлаждения. Варьируя скорости охлаждения, можно получать разнообразные структуры.

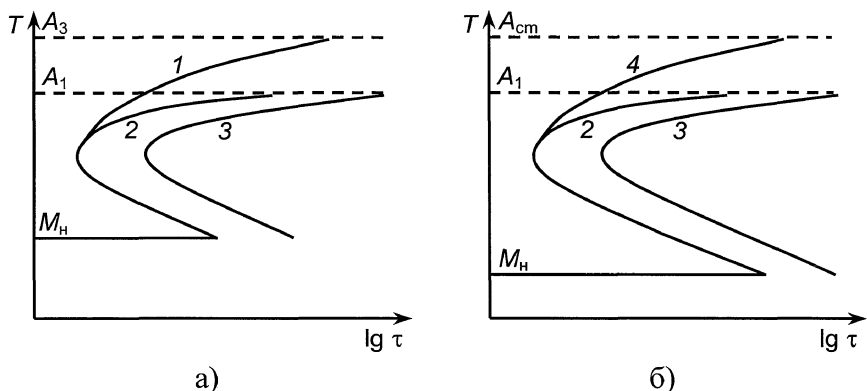


Рис. 9.5. Диаграммы изотермического распада переохлаждённого аустенита доэвтектоидной (а) и заэвтектоидной (б) стали:

1 — начало выделения феррита, 2 — начало образования эвтектоида, 3 — конец превращения, 4 — начало выделения цементита

Например эвтектоидную сталь будем охлаждать после аустенитизации со скоростями  $v_1 < v_2 < v_3 < v_4 < v_5$ . (рис. 9.6).

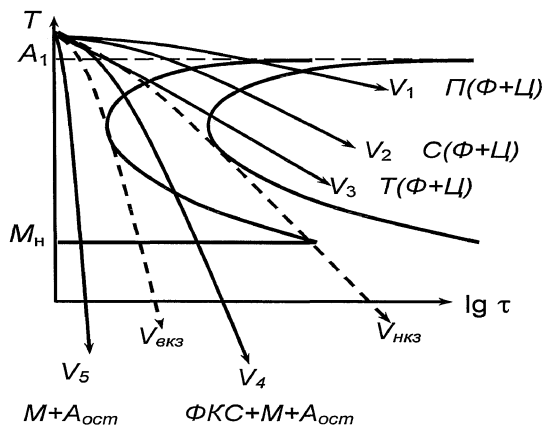


Рис. 9.6. Схема наложения кривых охлаждения на диаграмму изотермического распада переохлаждённого аустенита эвтектоидной стали

При скоростях охлаждения  $v_1 \dots v_3$  получит развитие диффузионное превращение переохлаждённого аустенита. При скорости  $v_1$  образуется перлит. Охлаждение с большими скоростями  $v_2$  и  $v_3$  вследствие увеличения

степени переохлаждения приводит к образованию более дисперсных феррито-карбидных структур (сорбита и троостита). Увеличение скорости охлаждения до  $v_4$  приводит к распаду аустенита сначала на ФКС, а затем на мартенсит. При скорости охлаждения  $v_5$  диффузионное превращение становится невозможным, и весь аустенит будет переохлаждаться до температур мартенситного превращения. В этом случае будет осуществлена *закалка* стали, при которой образуется мартенситная структура с небольшим количеством остаточного аустенита. Минимальная скорость охлаждения, при которой весь аустенит оказывается переохлажденным до температурного интервала мартенситного превращения, называется *верхней критической скоростью закалки* ( $V_{ВКЗ}$  на рис. 9.6). Наименьшая скорость охлаждения при которой в структуре впервые появляется мартенсит называется *нижней критической скоростью закалки* ( $V_{НКЗ}$ ).

Верхнюю критическую скорость можно определить по формуле

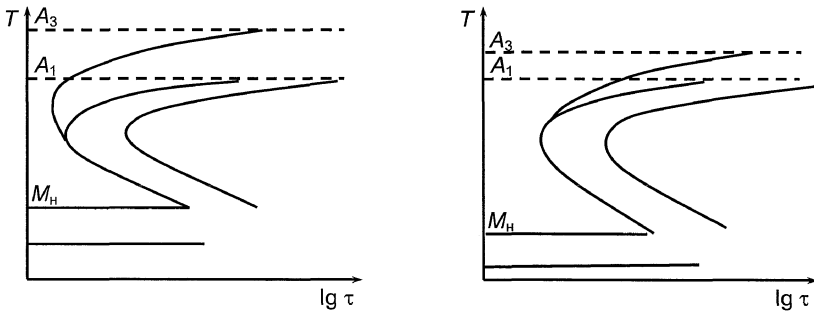
$$V_{ВКЗ} = \frac{A_1 - t_{min}}{1,5 \cdot \tau_{min}}$$

где  $A_1$  – температура критической точки;  $t_{min}$  – температура минимальной устойчивости аустенита;  $\tau_{min}$  – время минимальной устойчивости аустенита.

## 9.6. Контрольные вопросы

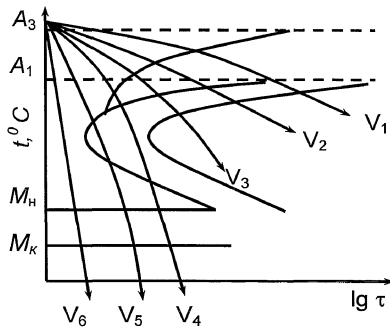
1. Может ли температура нагрева при термообработке быть выше температуры солидус сплава?
2. Возможна ли закалка сплава, в котором фазовые превращения отсутствуют?
3. Что такое диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита? В каких координатах она строится?
4. Какую операцию термообработки называют закалкой?
5. В чем заключается нормализация стали?
6. Какую операцию термообработки называют полным отжигом?
7. Что такое перлит, сорбит, троостит?
8. Что общего и в чем различие структур П, С, Т?
9. Что такое мартенсит?
10. От чего зависит твердость мартенсита?
11. Как выбрать температуру нагрева под закалку для доэвтектоидной стали?
12. Что такое перегрев?
13. В чем принципиальное различие в режимах полного отжига и закалки?
14. Какую форму имеют карбидные частицы в сорбите и троостите, полученные при распаде аустенита?

15. Какая из углеродистых сталей, диаграммы которых представлены на рисунке в относительном масштабе, имеет большее содержание углерода?

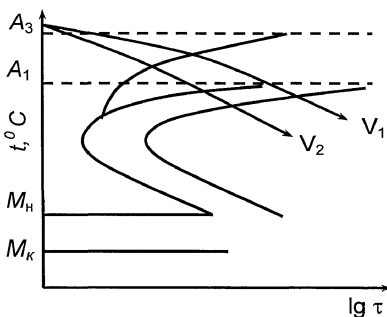


16. Какая структурная составляющая в доэвтектоидной стали не претерпевает полностью фазовых превращений при нагреве выше  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{c3}$

17. Какую структуру можно получить при охлаждении стали с указанными скоростями?



18. В каком случае (при охлаждении со скоростью  $V_1$  или  $V_2$ ) больше твердость и почему?





## 10. ОТПУСК СТАЛИ

Отпуском называют нагрев закаленной стали до температуры ниже фазовых превращений (т.е. для сталей ниже  $A_{C1}$ ), выдержка при этой температуре и последующее охлаждение. Отпуск заключительная операция термообработки, он формирует окончательную структуру, а, следовательно, и свойства стали.

Цели отпуска: получить более равновесную структуру, необходимые свойства и снять внутренние напряжения, возникшие в изделии при закалке.

### 10.1 Цель работы

Изучить характер влияния режима отпуска и легирующих элементов на устойчивость мартенсита в конструкционных низколегированных сталях.

### 10.2. Материал исследования

Образцы сталей 30, 30X, 30ХГС. Химический состав по ГОСТ 1050-88 и ГОСТ 4543-71 и критические точки приведены в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Марка стали	Химический состав, % вес.						Критические точки, °C	
	C	Si	Mn	Cr	S не более	P не более	$A_{C1}$	$A_{C3}$
30	0,27...0,35	0,17...0,37	0,5...0,8	—	0,04	0,035	730	813
30X	0,24...0,32	0,17...0,37	0,5...0,8	0,8...1,1	0,035	0,035	740	815
30ХГС	0,28..0,34	0,9...1,2	0,8...1,1	0,8...1,1	0,035	0,035	760	830

C-образные диаграммы для указанных сталей приведены в приложении.

### 10.3. Порядок выполнения работ

1. Выписать химический состав, критические точки, привести диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита исследуемых сталей.

2. Выбрать температуру нагрева под закалку  $t_n = A_{C3} + (30 \div 50)^{\circ}\text{C}$  и время выдержки при температуре нагрева (табл. 10.2).

Таблица 10.2

Продолжительность нагрева под закалку в зависимости от формы заготовки и температуры нагрева

Температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$	Форма изделия		
	круг	квадрат	пластина
	Продолжительность нагрева, мин		
	на 1 мм диаметра	на 1 мм толщины	
600	2,0	3,0	4,0
700	1,5	2,2	3,0
800	1,0	1,5	2,0
900	0,8	1,2	1,6
1 000	0,4	0,6	0,8

3. Пользуясь диаграммами изотермического распада переохлажденного аустенита (С-образными диаграммами), определить  $V_{\text{вкз}}$  указанных сталей и выбрать охлаждающую среду для закалки образцов.

4. Провести закалку образцов по выбранным режимам.

5. Заточить образцы на наждаке и измерить твердость всех образцов на приборе Роквелла по шкале «С» твердость HRC.

6. Закаленные образцы подвергнуть различным видам отпуска:

а) низкотемпературному отпуску (НТО) при температурах  $200^{\circ}\text{C}$ ;

б) среднетемпературному отпуску (СТО) при температурах  $400^{\circ}\text{C}$ ;

в) высокотемпературному отпуску (ВТО) при температурах  $600^{\circ}\text{C}$ .

Время выдержки при каждой температуре 30 минут.

7. После отпуска образцы заточить на наждаке и снова измерить твердость HRC.

8. Полученные данные занести в табл. 10.3.

9. По полученным данным построить график изменения твердости в зависимости от температуры отпуска, причем исходные (полученные после закалки данные) отметить на вертикальной оси.

#### 10.4. Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

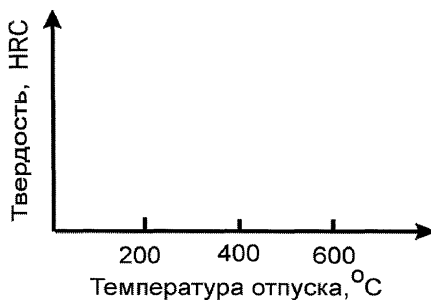
- 1) наименование и цель работы;
- 2) материал исследования;
- 3) порядок выполнения работы;

- 4) химический состав исследуемых сталей, их критические точки и диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита;
- 5) расчеты  $V_{\text{вкз}}$  сталей;
- 6) таблицу с полученными данными;

Таблица 10.3

Марка стали	Закалка				Твердость HRC после от- пуска при температурах		
	t <sub>н</sub> , °C	τ выд, мин	охл. среда	HRC	200 <sup>0</sup> C	400 <sup>0</sup> C	600 <sup>0</sup> C
30							
30X							
30ХГС							
Микро- структура							

- 7) представить опытные данные в виде следующего графика:



*Влияние температуры отпуска на твердость закаленной стали*

- 8) выводы по работе:
- а) о влиянии температуры отпуска на твердость закаленной стали;
- б) о влиянии легирующих элементов на  $V_{\text{вкз}}$  и твердость исследованных сталей при одинаковом режиме отпуска.

## 10.5. Методические указания

Закаленная сталь в общем случае имеет структуру мартенсита и остаточного аустенита. Обе эти фазы являются неравновесными (метастабильными). Поэтому уже при комнатной температуре в закаленной стали происходят процессы, приводящие ее структуру в более равновесное состояние. Однако при низких температурах скорость этих процессов ничтожно мала, и сталь сохраняет полученную при закалке структуру очень длительное время. С повышением температуры увеличивается подвижность атомов и активизируются процессы, приводящие структуру стали в более равновесное состояние.

При нагреве закаленной стали (при отпуске) от комнатной температуры до  $A_{C1}$  происходят четыре основных превращения.

Первое превращение в углеродистых сталях происходит в интервале температур от комнатной до  $\sim 200^{\circ}\text{C}$  и заключается в постепенном выделении из мартенсита избыточного углерода и образовании отпущенного мартенсита. Отпущенный мартенсит — это частично распавшийся мартенсит со степенью тетрагональности  $\frac{c}{a}$  близкой к единице и когерентно связанных с ним карбидных частиц.

$$M_{\text{зак}} \left( \frac{c}{a} > 1 \right) \rightarrow M_{\text{отп}} \left( \frac{c}{a} \rightarrow 1 \right)$$

Второе превращение происходит в интервале температур  $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$ . Здесь продолжается выделение углерода из мартенсита, но главным является распад остаточного аустенита:  $A_{\text{ост}} \rightarrow M_{\text{отп}}$ .

Третье превращение протекает в интервале температур  $300\text{--}400^{\circ}\text{C}$ . Распад мартенсита заканчивается, когерентность на границе между  $\alpha$ -твердым раствором и карбидом нарушается, т.е. происходит обособление карбидной фазы. В результате этого образуется феррито-карбидная структура (ФКС) высокой степени дисперсности, называемая трооститом отпуска ( $T_0$ ).

Четвертое превращение идет при дальнейшем нагреве (выше  $400^{\circ}\text{C}$  до  $A_{C1}$ ) и заключается в сфероидизации и коагуляции (укрупнении) карбидных частиц. Образуется структура, называемая сорбитом отпуска ( $S_0$ ).

Таким образом, при распаде мартенсита образуется ФКС (как и при распаде аустенита), но форма карбидных частиц получается зернистой, в то время как при распаде аустенита образуется ФКС пластинчатая. При одинаковых значениях  $HV$ ,  $\sigma_B$  и  $\delta$  зернистые структуры имеют более высокие значения  $\sigma_T$ ,  $\psi$  и  $KCU$ , т.е. обладают более высоким комплексом механических свойств.

Приведенные выше температуры превращений относятся к углеродистым сталям.

Легированные элементы уменьшают скорость диффузии и сдвигают все превращения в область более высоких температур. Поэтому для получения одинаковой твердости легированные стали надо отпускать при более высоких температурах. Различают три вида отпуска стали: низкотемпературный (НТО), среднетемпературный (СТО) и высокотемпературный (ВТО).

При НТО углеродистые стали нагревают до  $\sim 250^{\circ}\text{C}$ . Структура — отпущенный мартенсит. При этом снижаются внутренние напряжения, сохраняется высокая твердость, полученная при закалке, несколько возрастает вязкость.

СТО производят при температурах  $350\text{--}450^{\circ}\text{C}$ . Структура — троостит отпуска, имеющая высокий предел упругости при достаточно большой твердости.

ВТО производится при температурах  $500\text{--}680^{\circ}\text{C}$ . Структура — сорбит отпуска, которая обеспечивает наилучшее сочетание прочности и вязкости стали. Термообработку, состоящую из закалки и высокого отпуска, называют улучшением.

### 10.6. Контрольные вопросы

1. Какую операцию термообработки называют отпуском? С какой целью проводится отпуск?
2. При каких температурах проводится НТО для углеродистых сталей?
3. Какую структуру и свойства имеет сталь после НТО?
4. В каких случаях используют низкий отпуск?
5. При каких температурах производят СТО для углеродистых сталей?
6. Какую структуру и свойства имеет сталь после СТО?
7. При каких температурах производят ВТО для углеродистых сталей?
8. Какую структуру и свойства имеет сталь после ВТО?
9. Как изменяется прочность закаленной стали при повышении температуры отпуска?
10. Как влияет легирование стали на процессы, протекающие в стали при отпуске?
11. Какое практическое значение имеет способность легирования сдвигать развитие процессов отпуска в сторону более высоких температур?
12. Что такое улучшение?
13. Какова форма карбидных частиц в  $S_{\text{отп}}$  и  $T_{\text{отп}}$ ?
14. Чем отличается ФКС, полученная при отпуске, от ФКС, полученной при распаде аустенита?
15. Конструкционная углеродистая сталь после закалки и отпуска имеет твердость выше заданной. Назовите возможные причины этого. Какой дополнительной термообработкой можно устранить этот дефект?
16. Конструкционная углеродистая сталь после закалки и отпуска имеет твердость ниже заданной. Назовите возможные причины этого. Какой дополнительной термообработкой можно устранить этот дефект?

## 11. ТЕРМООБРАБОТКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Сплавы на основе алюминия находят широкое применение, так как характеризуются достаточно большой прочностью при малой плотности, хорошей коррозионной стойкостью, высокой электро- и теплопроводностью, хорошими технологическими свойствами. По технологии изготовления деталей алюминиевые сплавы делятся на деформируемые и литейные, они могут быть упрочняемые и неупрочняемые термообработкой. К деформируемым сплавам, упрочняемым термообработкой, относятся дуралюмины – сплавы системы Al-Cu-Mg.

### 11.1. Цель работы

Выяснить влияние температуры и продолжительности старения на твердость дуралюмина.

### 11.2. Материал исследования

Сплавы Д1 и Д16, химический состав которых приведен в табл. 11.1. (ГОСТ 4784-97)

Таблица 11.1

Марка сплава	Содержание элементов (остальное алюминий), % вес.				
	Cu	Mg	Mn	Fe не более	Si не более
Д1	3,8–4,8	0,4–0,8	0,4–0,8	0,7	0,8
Д16	3,8–4,9	1,2–1,8	0,3–0,9	0,5	0,5

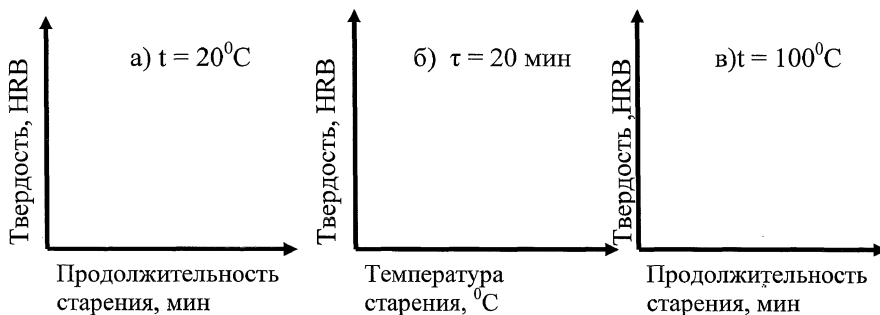
### 11.3. Порядок выполнения работы

1. Выписать химический состав сплавов Д1 и Д16.
2. Провести закалку образцов. Температура нагрева под закалку для сплава Д1 составляет 500...510<sup>0</sup>С; для сплава Д16 495...505<sup>0</sup>С. Время выдержки – 1 час, охлаждение в воде.
3. Замерить твердость закаленных образцов на приборе Роквелла по шкале «В» (стальным шариком при нагрузке 100 кг.)
4. Закаленные образцы подвергнуть :
  - а) естественному старению (при комнатной температуре) с выдержками 10, 20, 30, 45, 60 и 90 минут;
  - б) искусственному старению при температуре 100<sup>0</sup>С с выдержками 5, 10, 15, 15, 20 и 30 минут.
  - в) искусственному старению при температурах 100, 150, 175, 200 и 300<sup>0</sup>С с выдержкой 20 минут
5. Замерить твердость образцов на приборе Роквелла по шкале «В».
6. Полученные данные занести в табл. 11.2.

Таблица 11.2.

Марка сплава	HRB после закалки	Естественное старение (при комнатной температуре)		Искусственное старение		
		$\tau_{\text{выд.}}, \text{мин}$	HRB	$t_n, ^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{выд.}}, \text{мин}$	HRB
		10		100	5	
		20		100	10	
		30		100	15	
		45		100	20	
		60		100	30	
		90		150	20	
				175	20	
				200	20	
				300	20	

7. По данным табл. 11.2 построить графики:



8. Сделать выводы по работе.

#### 11.4. Содержание отчета

Отчет должен включать:

- 1) цель работы;
- 2) химический состав исследуемых сплавов;
- 3) описание работы;
- 4) таблицы экспериментальных данных;
- 5) графики зависимости твердости от температуры и продолжительности старения;
- 6) выводы по работе.

### 11.5. Методические указания

Основные легирующие элементы алюминиевых сплавов (Cu, Mg, Mn, Zn) образуют с алюминием ограниченные твердые растворы переменной растворимости, что позволяет упрочнять эти сплавы путем истинной закалки и последующего старения. Рассмотрим процессы, происходящие при термообработке алюминиевых сплавов на примере системы Al-Cu (рис.11.1).

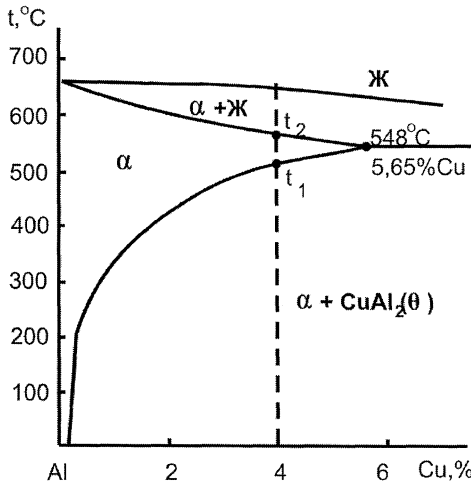


Рис. 11.1. Левый угол диаграммы состояния сплавов Al-Cu

При температуре  $548^\circ\text{C}$  растворимость меди в алюминии составляет 5,65%, а при комнатной температуре – 0,1%. В равновесном состоянии сплавы, содержащие до 5,65% Cu являются двухфазными ( $\alpha + \text{CuAl}_2$ ). При нагреве этих сплавов, например с 4%Cu, выше температуры  $t_1$ , но ниже  $t_2$  происходит растворение частиц химического соединения  $\text{CuAl}_2$  и образуется однофазный  $\alpha$  – твердый раствор. Если сплав быстро охладить (обычно закалка в воде), то высокотемпературное состояние  $\alpha$  – твердого раствора с содержанием 4% меди можно сохранить до комнатной температуры. Таким образом, при закалке фиксируется пересыщенный по сравнению с равновесным твердый раствор меди в алюминии (состав насыщенного раствора составляет 0,1% меди). С течением времени этот пересыщенный твердый раствор претерпевает распад и сплав переходит в более устойчивое состояние. Процесс самопроизвольного распада пересыщенного твердого раствора называют старением. Выдержка закаленного сплава при комнатной температуре называется естественным



старением, а при повышенных температурах (не выше  $t_1$ ), – искусственным.

При естественном старении в твердом растворе образуются области с повышенной концентрацией меди – зоны Гинье-Престона (зоны ГП). Они имеют форму дисков толщиной не более  $0,5 \dots 1$  нм. Зоны – полностью когерентные образования, между зоной и матрицей нет четкой границы. Эти зоны имеют решетку  $\alpha$ -раствора, но отличаются расстоянием между атомами. Поэтому образование зон ГП сопровождается местным искажением кристаллической решетки (рис. 11.2). Многочисленные зоны затрудняют прохождение дислокаций, что приводит к упрочнению сплава и снижению его пластичности. Естественное старение в этих сплавах начинается непосредственно после закалки и заканчивается через 5–7 суток.

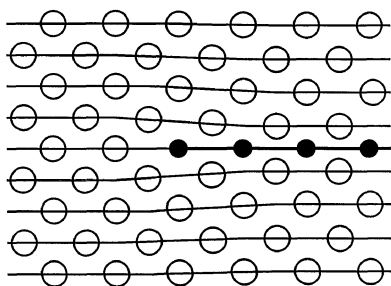
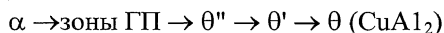


Рис. 11.2. Модель строения твёрдого раствора Al–Cu с зонами ГП (● — атомы меди)

При повышенных температурах, ввиду увеличения диффузионной подвижности атомов, распад твердого раствора пойдет быстрее и полнее. При искусственном старении в сплавах Al–Cu наблюдается следующая последовательность распада:



1. При температурах до  $100^\circ\text{C}$  в твердом растворе образуются зоны ГП дискообразной формы толщиной  $0,5 \dots 1$  нм.

2. При температурах  $100\text{--}150^\circ\text{C}$  из пересыщенного раствора выделяется метастабильная  $\theta''$  фаза, структура которой является промежуточной между  $\alpha$ -раствором и стабильной  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) фазой. При указанных температурах происходит рост зон ГП до толщины  $0,1 \dots 0,4$  нм и обогащение их атомами меди до состава близкого к  $\text{CuAl}_2$ . Решетка  $\theta''$  фазы уже отличается от решетки матрицы, но когерентность границ сохраняется.

3. Повышение температуры до  $150\text{--}200^\circ\text{C}$  приводит к образованию метастабильной промежуточной фазы  $\theta'$ , которая имеет тот же состав что и равновесная  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ). Выделения  $\theta'$ - фазы частично когерентные, и поле упругих напряжений вокруг них меньше, чем вокруг когерентных выделений  $\theta''$ - фазы и зон ГП.

Наиболее значительное упрочнение наблюдается на стадии выделения зон ГП и дисперсных частиц метастабильных фаз.

4. При температурах 200–250<sup>0</sup>С происходит обособление  $\theta'$ - фазы, нарушение когерентности и образование стабильной  $\theta$ - фазы.

При дальнейшем повышении температуры частицы выделившейся  $\theta$ - фазы коагулируют (укрупняются) что сопровождается разупрочнением сплава (перестариванием).

Чем выше температура старения, тем больше диффузионная подвижность атомов, быстрее проходят все стадии распада твердого раствора, быстрее идет упрочнение и раньше наступает перестаривание.

В более легированных дюралюминах, которые содержат достаточное количество магния, кроме  $\text{CuAl}_2$  ( $\theta$ -фазы), образуется также  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  ( $S$ -фаза).

### **11.6. Контрольные вопросы**

1. Что такое истинная закалка? Какие цели она преследует?
2. Какие виды старения существуют?
3. Какое старение называется естественным? Какие процессы происходят при этом?
4. Какое старение называют искусственным? Какие процессы происходят при этом?
5. Как изменяются механические свойства (твердость) при естественном старении?
6. Как изменяются механические свойства (твердость) в процессе искусственного старения?

## **12. МАРКИРОВКА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

### **12.1. Цель работы**

Изучить принципы маркировки сплавов на основе цветных металлов и научиться распознавать материал по его марке.

### **12.2. Порядок работы**

1. Самостоятельно изучить принципы маркировки цветных металлов и сплавов.
2. Получить у преподавателя индивидуальное задание и выполнить его.

### **12.3. Методические указания**

Маркировка сплавов на основе цветных металлов более сложна, чем для сталей. Многие сплавы маркируются лишь условными номерами. В тех же случаях, когда химический состав сплава явно указывается в его марке, приняты следующие обозначения элементов:

А — алюминий (Al);	Мг — магний (Mg);	Су — сурьма (Sb);
Б — бериллий (Be);	Мц — марганец (Mn);	Т — титан (Ti);
Ж — железо (Fe);	Мш — мышьяк (As);	Ф — фосфор (P);
К — кремний (Si);	Н — никель (Ni);	Х — хром (Cr);
Кд — кадмий (Cd);	О — олово (Sn);	Ц — цинк (Zn).
М — медь (Cu);	С — свинец (Pb);	

### 12.3.1. Маркировка алюминиевых сплавов

Первичный чистый алюминий (ГОСТ 11069-2001) маркируется буквой А, и цифрами, которые указывают минимальное содержание алюминия:

А95 — алюминий высокой чистоты ( $\geq 99,95$  %Al);

А7 — алюминий технической чистоты ( $\geq 99,7$  %Al);

А0 — алюминий технической чистоты ( $\geq 99,0$  %Al).

#### а) Деформируемые алюминиевые сплавы (ГОСТ 4784-97)

Деформируемые алюминиевые сплавы обычно маркируют условными буквами и цифрами, так что химический состав сплава из марки определить нельзя — только из ГОСТа или справочника. Примеры наиболее распространённых марок сплавов приведены ниже.

1. Чистый алюминий (в порядке уменьшения чистоты):

АД00 АД0 АД1 АД

2. Сплавы Al–Mg (здесь цифра указывает %Mg):

АМг1 АМг2 АМг5 АМг6

3. Дюралюмины (система Al–Cu–Mg):

Д1 Д16 Д18 Д19 В65

4. Ковочные сплавы (система Al–Cu–Mg–Si):

АК6 АК8

5. Высокопрочные сплавы (система Al–Cu–Mg–Zn):

В93 В95 В96Ц

Имеются и другие системы сплавов: Al–Mn (АМц); авиали Al–Mn–Si (АВ; АД31; АД33; АД35); жаропрочные сплавы (АК4; АК4-1) и т.п.

Для многих сплавов принята цифровая маркировка из четырёх цифр, начинающаяся с «1»: 1160 (Д16), 1380 (АК8), 1915, 1420 и т.п.

## **б) Литейные алюминиевые сплавы (ГОСТ 1583-93)**

Литейные алюминиевые сплавы маркируются буквами АЛ (иногда ВАЛ), за которыми следует цифра — условный номер сплава. С конца 1980-х гг. введена параллельная система маркировки, указывающая химический состав сплава; эти марки начинаются с буквы А (алюминий), после которой перечисляются легирующие элементы. Примеры:

АЛ2 = АК12 (Al + 12%Si);  
АЛ19 = АМ5 (Al + 5%Cu);  
АЛ27 = АМг10 (Al + 10%Mg);  
АЛ32 = АК8М (Al + 8%Si + 1%Cu).

### **12.3.2. Маркировка магниевых сплавов**

Деформируемые магниевые сплавы (ГОСТ 14957-76) маркируются буквами МА, за которыми следует условный номер сплава:

МА2 (Mg–Al–Zn–Mn);  
МА14 (Mg–Zn–Zr);  
МА21 (Mg–Li).

Литейные магниевые сплавы (ГОСТ 2856-79) маркируются буквами МЛ, за которыми также следует условный номер:

МЛ4 (Mg–Al–Zn);  
МЛ6 (Mg–Al–Zn);  
МЛ12 (Mg–Zn–Zr).

### **12.3.3. Маркировка титановых сплавов**

Титановые сплавы (ГОСТ 19807-91) обычно маркируются буквами ВТ (реже ОТ, ПТ, АТ), за которыми следует условный номер сплава:

ВТ1-0 (нелегированный титан);  
ВТ1-1 (нелегированный титан);  
ВТ5 (Ti–5%Al);  
ВТ6 (Ti–5%Al–4%V);  
ВТ14 (Ti–5%Al–4%Mo–1%V);  
ОТ4-1 (Ti–2%Al–1%Mn).

Если сплав не деформируемый, а литейный, то в конце марки добавляется буква Л: ВТ5Л, ВТ9Л.

### **12.3.4. Маркировка медных сплавов**

**а) Марки чистой меди по ГОСТ 859-2001:**

М00 ( $\geq 99,96\%$ Cu);

М0 ( $\geq 99,93\% \text{Cu}$ );

М1 ( $\geq 99,90\% \text{Cu}$ );

М2 ( $\geq 99,70\% \text{Cu}$ );

М3 ( $\geq 99,50\% \text{Cu}$ ).

Сплавы меди делятся на латуни (Cu–Zn), бронзы (сплавы с любыми элементами, кроме Zn и Ni) и медно-никелевые сплавы.

#### **б) Латуни (ГОСТ 15527-70, 17711-93)**

*Деформируемые* латуни маркируются буквой Л, за которой следуют цифры — содержание меди в процентах. Если латунь легированная (содержит, кроме меди и цинка, другие элементы), то легирующие элементы перечисляются после буквы Л, а их содержание указывается в конце марки. Примеры:

Л96 (Cu + 4%Zn);

Л80 (Cu + 20%Zn);

Л68 (Cu + 32%Zn);

Л63 (Cu + 37%Zn);

ЛО90-1 (Cu + 9%Zn + 1%Sn);

ЛА77-2 (Cu + 21%Zn + 2%Al);

ЛАН59-3-2 (Cu + 36%Zn + 3%Al + 2%Ni);

ЛС63-3 (Cu + 34%Zn + 3%Pb).

В марках *литейных* латуней после буквы Л содержание меди не указывается, а просто перечисляются все легирующие элементы (включая цинк), причём содержание каждого элемента указывается сразу же после соответствующей буквы:

ЛЦ30А3 (Cu + 30%Zn + 3%Al);

ЛЦ16К4 (Cu + 16%Zn + 4%Si);

ЛЦ38Мц2С2 (Cu + 38%Zn + 2%Mn + 2%Pb).

#### **б) Бронзы (ГОСТ 493-79, 613-79, 5017-74, 18175-78)**

Бронзы маркируются буквами Бр, за которыми перечисляются легирующие элементы. Как и в случае латуней, у деформируемых бронз содержание элементов указывается в конце марки, а у литейных — после соответствующей буквы.

Примеры марок деформируемых бронз:

БрОЦ4-3 (Cu + 4%Sn + 3%Zn);

БрОФ6,5-0,4 (Cu + 6,5%Sn + 0,4%P);

БрА5 (Cu + 5%Al);

БрАМц9-2 (Cu + 9%Al + 2%Mn);

БрАЖН10-4-4 (Cu + 10%Al + 4%Fe + 4%Ni);

БрБ2 (Cu + 2%Be);

БрКН1-3 (Cu + 1%Si + 3%Ni).

Примеры марок литейных бронз:

БрО10Ф1 (Cu + 10%Sn + 1%P);

БрО5Ц5С5 (Cu + 5%Sn + 5%Zn + 5%Pb);

БрА9Ж3Л (Cu + 9%Al + 3%Fe);

БрС30 (Cu + 30%Pb).

### **в) Медно-никелевые сплавы (ГОСТ 492-73)**

Марка начинается с буквы М (медь); после неё перечисляются легирующие элементы. Примеры:

МН19 (Cu + 19%Ni — мельхиор);

МНЦ15-20 (Cu + 15%Ni + 20%Zn — нейзильбер);

МНА13-3 (Cu + 13%Ni + 3%Al — куниаль);

МНМц3-12 (Cu + 3%Ni + 12%Mn — манганин).

## **12.3.5. Маркировка других сплавов**

### **а) Никелевые жаростойкие и жаропрочные сплавы (ГОСТ 5632-72)**

По структуре и свойствам эти сплавы родственны хромоникелевым аустенитным сталям, поэтому легирующие элементы в них обозначаются теми же буквами, что и в сталях.

В марках нихромов — жаростойких сплавов для электронагревателей и т.п. — указывается содержание хрома и никеля:

X20Н80 (20%Cr + 80%Ni);

X15Н60 (15%Cr + 60%Ni + 25%Fe).

Марки жаропрочных, а также коррозионностойких сплавов на никелевой основе обычно начинаются с букв ХН (сплавы почти всегда содержат хром), за которыми указывается содержание никеля, а затем перечисляются остальные легирующие элементы без указания их концентрации. Примеры:

ХН77ТЮР (77%Ni + 20%Cr + 2%Ti + 1%Al + 0,01%B);

ХН65ВМТЮ (65%Ni + 17%Cr + 10%W + 4%Mo + 2%Ti + 2%Al).

### **б) Баббиты (ГОСТ 1320-74)**

Баббиты — легкоплавкие сплавы Sn–Sb, Pb–Sn–Sb, Pb–Sb, применяемые для вкладышей подшипников скольжения. Баббиты маркируются буквой Б, после которой указывают содержание олова. Наиболее распространены:

Б89 (89%Sn + 8%Sb + 3%Cu);

Б83 (83%Sn + 11%Sb + 6%Cu);

Б16 (66%Pb + 16%Sn + 16%Sb + 2%Cu).

**в) Твёрдые сплавы (ГОСТ 3882-74)**

Твёрдыми сплавами называют металлокерамические материалы, применяемые для изготовления рабочих частей ответственного режущего инструмента. Они представляют собой спечённые порошки карбидов тугоплавких металлов (WC, TiC, TaC) на кобальтовой связке и обладают очень высокой твёрдостью и теплостойкостью. Вольфрамовые твёрдые сплавы маркируют буквами ВК и цифрой, указывающей содержание кобальта:

ВК6 (94%WC + 6%Co);

ВК8 (92%WC + 8%Co).

В марках титановольфрамовых твёрдых сплавов указывают содержание карбида титана TiC и кобальта:

T30K4 (66%WC + 30%TiC + 4%Co);

T15K6 (79%WC + 15%TiC + 6%Co).

В титанотанталовольфрамовых — суммарное содержание карбидов TaC и TiC и содержание кобальта:

TT7K12 (81%WC + 4%TiC + 3%TaC + 12%Co);

TT20K9 (71%WC + 8%TiC + 12%TaC + 9%Co).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

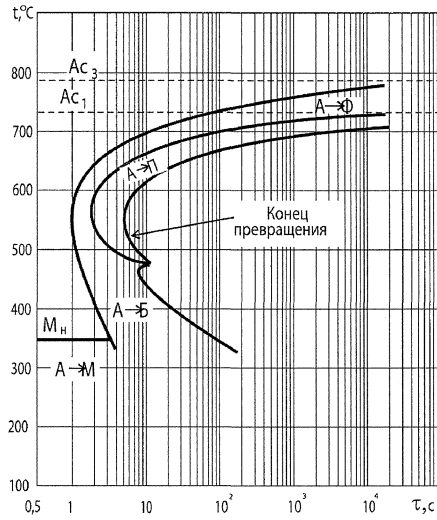
1. Материаловедение: учебное пособие / М.А.Смирнов, К.Ю.Окишев, Х.М.Ибрагимов, Ю.Д.Корягин.– Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005.–Ч.1.–139с.
2. Материаловедение: учебное пособие к лабораторным работам/ Г.И.Медведева, Х.М.Ибрагимов, Э.А.Агеева.– Челябинск: ЧГТУ, 1993.–64с.
3. Геллер Ю.А., Рахштадт Н.Г. Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи.– М.: Металлургия, 1984.–374 с.
4. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп.– М.: Издательский дом Альянс, 2009. – 527 с.
5. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И.. Материаловедение: Учебник для вузов по металлургическим, машиностроительным и общетехническим специальностям. / Под общ. ред. Ю.П.Солнцева. – СПб.: Химиздат, 2004. – 734 с.
6. Материаловедение: Учебник для вузов по специальностям в области техники и технологии: посвящено памяти И.И.Сидорина / Б.Н.Арзамасов, В.И.Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под общ. ред. Б.Н.Арзамасова, Г.Г.Мухина. – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – 646 с.
7. Попова Л.Е., Попов А.А. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета раствора в сплавах титана: Справочник термиста. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1991. –503 с.



# ПРИЛОЖЕНИЕ

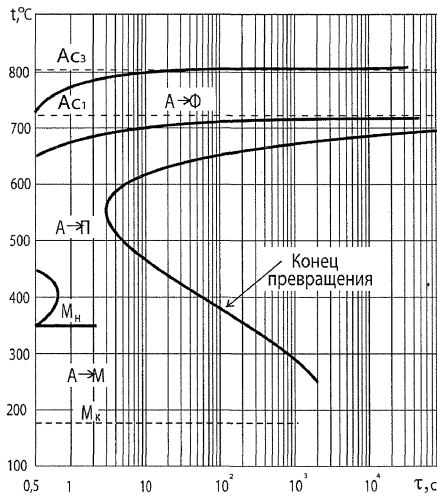
## Сталь 45

C	Si	Mn	Cr	V	A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>	M <sub>H</sub>	T <sub>H</sub>
0,44	0,22	0,66	0,15	0,02	735	785	350	880



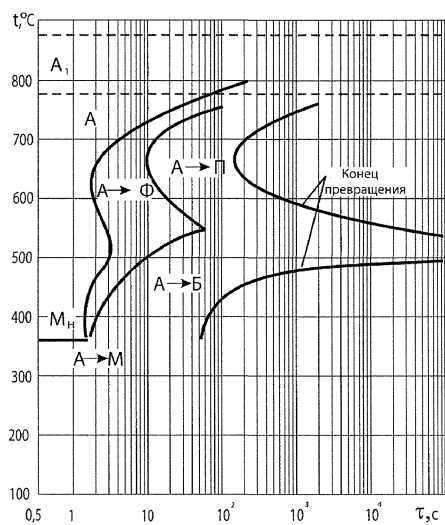
## Сталь 35

C	Si	Mn	Cr	Ni	A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>	M <sub>H</sub>	T <sub>H</sub>
0,35	—	0,37	—	—	720	800	350	840



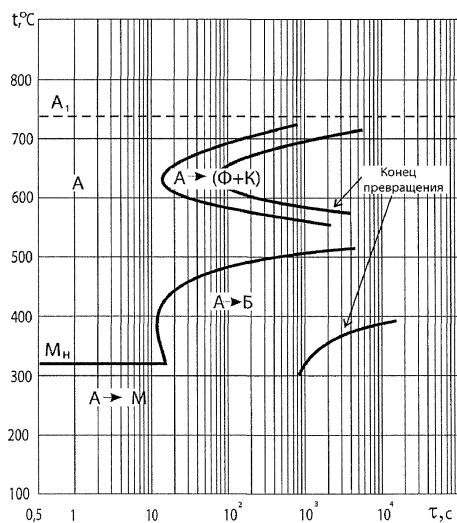
# Сталь 30ХА

C	Si	Mn	Cr	Ni	A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>	M <sub>H</sub>	T <sub>H</sub>
0,3	0,25	0,5	1,28	0,09	770	820	360	875



# Сталь 30ХГСА

C	Si	Mn	Cr	Ni	A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub>	M <sub>H</sub>	T <sub>H</sub>
0,29	1,05	0,98	0,91	0,13	740	830	320	900



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1. Макроструктурный метод исследования металлов и сплавов.....	4
2. Микроструктурный метод исследования металлов и сплавов .....	14
3. Пластическая деформация металлов .....	17
4. Рекристаллизационный отжиг.....	23
5. Изучение диаграммы состояния сплавов системы железо-углерод.....	27
6. Структуры углеродистых сталей в равновесном состоянии.....	35
7. Структуры чугунов.....	40
8. Маркировки сталей и чугунов.....	46
9. Влияние скорости охлаждения на структуру и твердость углеродистой стали .....	54
10. Отпуск стали .....	64
11. Термообработка алюминиевых сплавов.....	69
12. Маркировка цветных металлов и сплавов .....	73
Библиографический список .....	79
Приложение .....	80

*Учебное издание*

**Лапина** Ирина Вильевна,  
**Ильичев** Владимир Леонидович,  
**Созыкина** Анна Сергеевна

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебное пособие  
к лабораторным работам

Техн. редактор *А.В. Миних*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 24.12.2013. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 4,88. Тираж 30 экз. Заказ 757/567.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина 76.