

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Ульяновский государственный технический университет»

Л. А. Виноградова, Ю. А. Курганова

СТРУКТУРА СТАЛЕЙ

Учебное пособие

Для студентов обучающихся по специальностям:

150201.65, 190201.65, 190601.65, 220501.65

УЛЬЯНОВСК

2009

УДК 620.2(075.8)
ББК 34.22 я7
В49

Рецензенты:

Кафедра «Технология металлов» Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии (зав. кафедрой кандидат технических наук, доцент А. В. Морозов); кандидат технических наук, профессор В. О. Надольский;

Кафедра «Физическое материаловедение» Ульяновского государственного университета, доктор технических наук, профессор И. С. Антонов.

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия.

Виноградова Л. А.

В49 Структура сталей : учебное пособие / Л. А. Виноградова,
Ю. А. Курганова. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – 54 с.

ISBN 978-5-9795-0546-6

Представлен широкий спектр структур конструкционных и инструментальных сталей. Даны подробные объяснения структурных и фазовых составляющих. Наглядные микрофотографии и схемы структур помогают составить представление о внутреннем строении сталей различного химического состава в зависимости от операций технологического процесса изготовления изделий и условий эксплуатации.

Пособие предназначено для студентов, изучающих теоретические основы технической дисциплины «Материаловедение» всех форм обучения (специальности 150201.65, 190201.65, 190601.65, 220501.65).

Подготовлено на кафедре «Материаловедение и обработка металлов давлением».

УДК 620.2(075.8)
ББК 34.22 я7

© Виноградова Л. А., Курганова Ю. А., 2009
ISBN 978-5-9795-0546-6
© Оформление. УлГТУ, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Введение	5
Общая характеристика сталей.....	8
1. Типы соединений компонентов в сталях	9
2. Углеродистые стали	10
3. Поверхностное легирование стальных изделий	17
4. Легированные стали.....	20
5. Классификация легированных сталей	21
6. Быстрорежущие стали	24
7. Микроструктура холоднодеформированной и рекристаллизованной стали	34
Приложение А	39
Приложение Б.....	43
Приложение В	46
Приложение Г	47
Контрольные вопросы	48
Заключение	49
Предметный указатель.....	50
Глоссарий.....	52
Библиографический список.....	55

ПРЕДИСЛОВИЕ

Потребность в данном пособии вызвана тем, что объем и направленность курса «Материаловедение» различается в зависимости от специализации будущих инженерно-технических работников различных отраслей промышленности.

Сталь – конструкционный материал, работающий при отрицательных и повышенных температурах, в воздушной, газовой и водных средах. На эксплуатационные свойства изделий влияет структура (строение металла), которое наследуется в зависимости от методов изготовления, специальной обработки стали с целью придания им необходимых качеств.

Цель учебного пособия – помочь студентам, изучающим раздел «Структуры сталей», понять взаимосвязь между химическим составом, строением, технологией изготовления и свойствами, что необходимо для рационального использования материала и обеспечения заданных характеристик надежности с учетом экономических показателей.

Авторы с благодарностью примут критические замечания, которые помогут совершенствованию данного пособия.

Техническая помощь оказана студентами гр. ТМд-32: Димухаметов Ильназ Суфарович, Кривов Юрий Георгиевич, Никишин Алексей Александрович.

ВВЕДЕНИЕ

В данном учебном пособии сконцентрирован материал монографий, научных статей и справочной литературы по структурам сталей. В нем рассмотрены технологические этапы формирования структуры и свойств сталей, применяемых в настоящее время как в отечественном, так и зарубежном машиностроении. Большое внимание уделяется контролю качества сталей в состоянии поставки и после упрочняющей обработки. Приведены рекомендации по выбору сталей в зависимости от условий эксплуатации, механические характеристики обрабатываемых и обрабатывающих материалов. Систематизируются возможные дефекты структуры и приемы их устранения.

Учебное пособие является составной частью курса лекций по дисциплинам «Материаловедение» (специальности: 22050165, 15020165, 19020165, 19060165, 15100165), «Металловедение и технология конструкционных материалов», «Технология конструкционных материалов».

Данное пособие полностью соответствует дисциплине «Материаловедение», преподаваемой в технических университетах как федерального компонента ГОС ВПО и УМК (раздел стали) и является доступным для понимания студентом материала без обращения к другим источникам и систематического изучения основных принципов управления структурой сталей с целью получения сталей с заданными свойствами.

Цель настоящего пособия – показать изменения в микроструктуре сталей под влиянием различных термодинамических факторов (температуры, давления, времени) при помощи металлографического микроскопа, преимущественно оптического (см. приложение В). Этот метод является наиболее применимым в лабораториях высших технических учебных заведений и, особенно, на производстве. Приводятся также и электронные микрофотографии, позволяющие исследовать мельчайшие детали микроструктуры, неразличимые под оптическим микроскопом структуры сталей

сфотографированы с микрошлифов, протравленных в основном 3% раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Точность и результаты микроскопического исследования зависят от техники изготовления микрошлифов. Изготовление микрошлифа состоит из ряда последовательных операций: вырезки образца, подготовки его поверхности, шлифования, полирования и травления. Выбор места вырезки образца для изготовления микрошлифа следует производить после осмотра исследуемого металла особенно его макроструктуры и излома, определения твердости и технологических проб при исследовании поломки детали, ее износа, а также при выявлении дефектов в сталях. При исследовании проката и поковок необходимо брать шлифы вдоль и поперек прокатки или направления деформации при ковке. Нагрев образцов должен быть исключен при вырезке в случае исследования изделий, подвергнутых термической обработке. Для этого необходимо непрерывно охлаждать место реза или вырезать ножовкой, чтобы не вызвать изменение структуры стали. При нагреве закаленной стали во время вырезки возможен отпуск (рис. 1а, б).

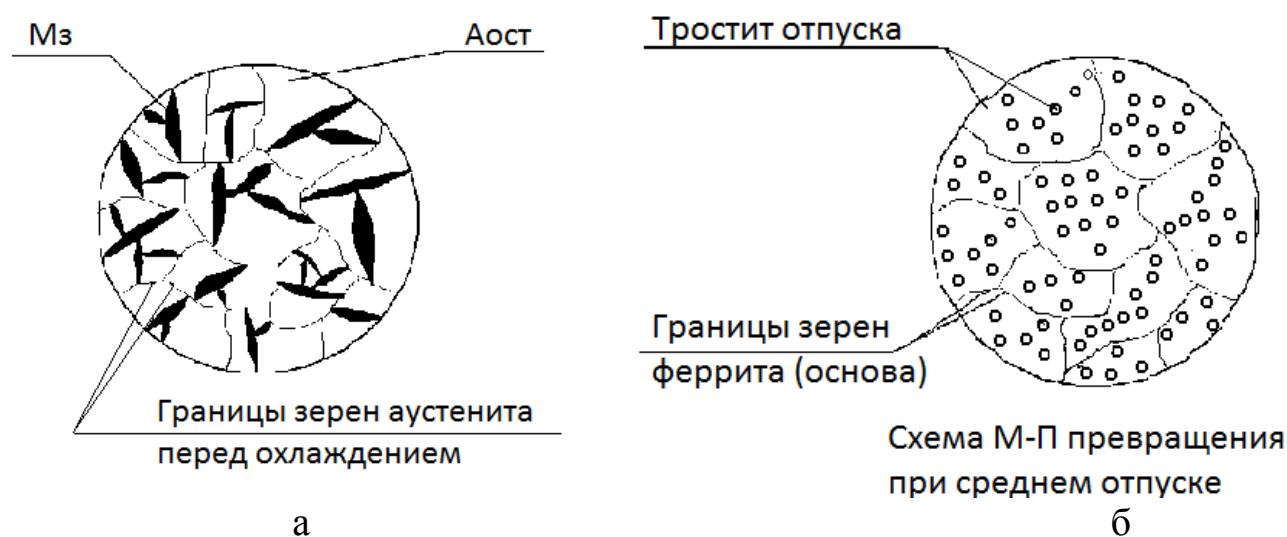


Рис. 1. М→П превращение: Схемы микроструктур поверхности закаленной дозвтектоидной стали в зоне реза при вырезке микрошлифов:
а – с охлаждением после закалки;
б – без охлаждения получается отпущенная микроструктура

Методика работы над материалом:

1. Студент должен ознакомиться с материалом пособия.

2. При самостоятельной подготовке провести анализ частных вопросов по мере их чтения:

- для чего используется материал, чем вызвана необходимость его применения;

- в чем суть излагаемой проблемы (попытаться схематично представить процесс и идею того или иного метода термической обработки);

- понять разницу между равновесными и неравновесными процессами, приводящими к изменению структуры сталей.

3. Ответить на контрольные вопросы.

4. При необходимости, а также при желании углубленного изучения предмета рекомендуется обращаться к литературе, перечень которой приводится в библиографическом списке. Можно получить консультацию преподавателя.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СТАЛЕЙ

Стали – многокомпонентные сплавы на основе железа и углерода. Железо и углерод – полиморфные химические элементы, которые способны изменять тип элементарной кристаллической ячейки под действием температуры и давления.

Если углерод является основным легирующим элементом в сплавах на основе железа, то такие стали называют углеродистыми. Содержание углерода в таких сталях не превышает 2,14 %. Сталь, в которой присутствуют легирующие элементы (усложняющие ее химический состав), называется легированной.

Для оценки качества сталей, закономерностей процессов разрушения, разработки новых и совершенствования существующих технологических процессов, а также при борьбе с браком и при работах над улучшением качества продукции необходимо знать их структурное состояние и его влияние на свойства (эксплуатационные, механические, технологические, химические, физические).

Структура сталей является характеристикой свойств. Структурно-чувствительные свойства зависят от термической обработки (твердость, прочность). Характеристики жесткости (модуль нормальной упругости, модуль сдвига), жаростойкость (окалиностойкость) не чувствительны к изменениям структуры.

Под структурой понимают строение, форму, размеры и характер расположения соответствующих фаз. **Фазы** являются структурными составляющими, имеющими однородное (гомогенное) кристаллическое строение и агрегатное состояние, отделенные от других составных частей поверхностями (границами) раздела. Составляющими микроструктур являются фазы. Под фазой понимают однородную часть сплава, имеющую границу раздела, при переходе через которую состав и свойства меняются скачком. Стали могут быть однофазными, двухфазными и многофазными.

Структура сталей зависит главным образом от того, в какие химические взаимодействия вступают компоненты (химические элементы, входящие в состав стали). Компоненты могут образовывать следующие фазы: жидкие растворы, твердые растворы, химические соединения. В твердом состоянии в сталях может не быть химического взаимодействия между компонентами, в таком случае структура является механической смесью, состоящей из двух и более фаз.

1. Типы соединений компонентов в сталях

Условия взаимодействия компонентов в сталях способствуют образованию следующих типов соединений:

1. Твердые растворы, в которых основной компонент (растворитель) сохраняет свой тип кристаллической решетки, а атомы растворенного компонента замещают часть атомов в этой решетке (твердый раствор замещения) или внедряются в междоузлия (твердый раствор внедрения). На диаграмме состояния железо-углерод (см. приложение А) им соответствуют области, ограниченные убывающими и возрастающими линиями растворимости. Твердые растворы: аустенит, феррит.

Твердый раствор может быть фазой и структурой.

2. Химическое соединение имеет новый тип кристаллической решетки, который отличается от кристаллических решеток составляющих его компонентов. Поэтому подобно химически чистому элементу плавится при постоянной температуре. Оно образуется при строгом стехиометрическом соотношении химических элементов, т. е. имеет химическую формулу – Fe_3C (цементит) – это **однофазный сплав** на основе железа, содержащий 6,67 % углерода (см. приложение А).

Химическое соединение может быть фазой и структурой. Это оксиды (FeO), карбиды (VC , WC , TiC), интерметаллиды (FeAl).

3. Механическая смесь фаз, которые не растворяются друг в друге, каждая сохраняет свой тип элементарной ячейки (кристаллической ре-

шетки). Условие образования: строго постоянные температура и химический состав стали в критических точках С (1147 °С, 4,3% С) и S (727 °С, 0,83% С) (см. приложение А).

Механическая смесь всегда структура, так как в ее состав могут входить две и более фаз. При температуре 20 °С перлит и ледебурит являются механической смесью феррита и цементита (см. приложение А).

Основные фазы и структуры в сплавах на основе железа приведены в приложении Б.

2. Углеродистые стали

Химический состав углеродистых сталей приведен в Приложении Г.

Разнообразие углеродистых сталей принято классифицировать по различным признакам, приведенным ниже.

По назначению:

- конструкционные;
- инструментальные.

По качеству (качество стали повышается с уменьшением содержания в ней вредных примесей):

- обыкновенного качества ($0,04 \% \leq S \leq 0,06 \%$, $0,04 \% \leq P \leq 0,08 \%$);
- качественные ($0,03 \% \leq S \leq 0,04 \%$; $0,03 \% \leq P \leq 0,04 \%$);
- высококачественные ($S \leq 0,03 \%$; $P \leq 0,03 \%$).

Качество стали повышается с уменьшением содержания в ней вредных примесей серы и фосфора.

По % содержанию углерода (С):

- низкоуглеродистые (до 0,25 % С);
- среднеуглеродистые (0,3 – 0,6 % С);
- высокоуглеродистые ($\geq 0,7 \%$ С).

По равновесной микроструктуре и % содержание углерода при 20 °С:

- перлит+феррит (до 0,83 % С) – доэвтектоидные (рис. 2);
- перлит (= 0,83 % С) – эвтектоидные (рис. 3);
- перлит+вторичный цементит (более 0,83 % С) – заэвтектоидные (рис. 4).

Равновесное состояние достигается при медленном охлаждении стальных изделий в печи, т. е. после операции термической обработки, называемой отжигом. Микроструктура после всех видов отжига углеродистых сталей соответствует диаграмме железо–цементит (см. приложение А). Микроструктура доэвтектоидной стали (в отожженном состоянии) состоит из светлых участков (зерен) феррита и темных участков (зерен) перлита (рис. 2). В доэвтектоидных сталях практически весь углерод содержится в перлите, поэтому по виду структуры можно примерно определить марку стали, используя формулу

$$\%C=0,83X/100,$$

где X, % – поле зрения микрошлифа, занимаемое перлитом, в котором по условию его образования содержание углерода = 0,83%.

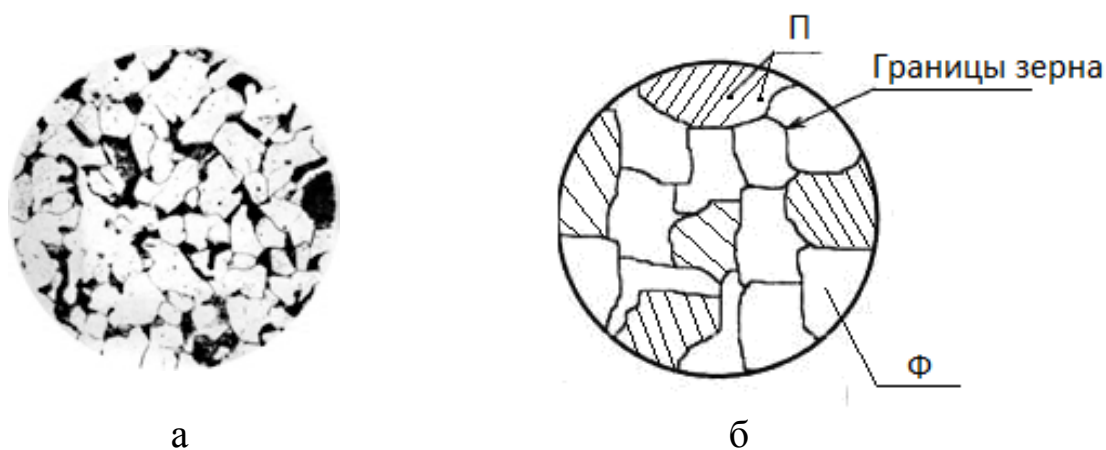


Рис. 2. А→П превращение: а – доэвтектоидная сталь 20 (0,2 % углерода).
Травитель: 3% р-р азотной кислоты в спирте. Обработка: отжиг. Твердость: 111НВ.
Основа: Fe. Структурные составляющие: феррит и перлит;
б – схема изображения доэвтектоидной стали

Микроструктура эвтектоидной стали (в отожженном состоянии) состоит из чередующихся параллельных пластин феррита и пластин цемента. Все поле зрения (100 %) занято пластинчатым перлитом, при содержании углерода в перлите = 0,83 % (рис. 3).

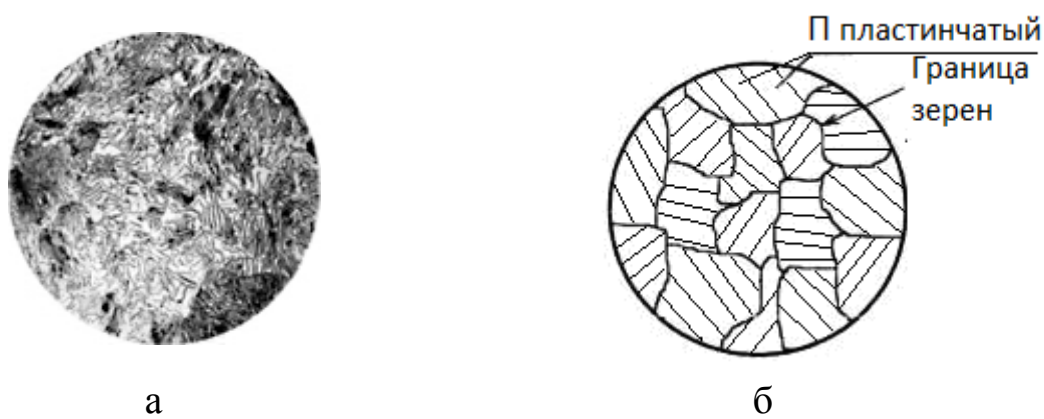


Рис. 3. А→П превращение: а – эвтектоидная сталь 80 (0,8 % углерода).
Травитель: 3% р-р азотной кислоты в спирте. Обработка: отжиг. Твердость: 174 НВ.
Основа: Fe. Структурная составляющая: пластинчатый перлит (100 %);
б – схема изображения эвтектоидной стали

Микроструктура заэвтектоидной стали в отожженном состоянии – чередующиеся параллельные пластины феррита и цементита на темном фоне перлита и пограничные выделения вторичного цементита в виде сплошной тонкой светлой сетки по границам зерен бывшего аустенита, превратившегося (при медленном охлаждении с печью) в пластинчатый перлит (рис. 4).

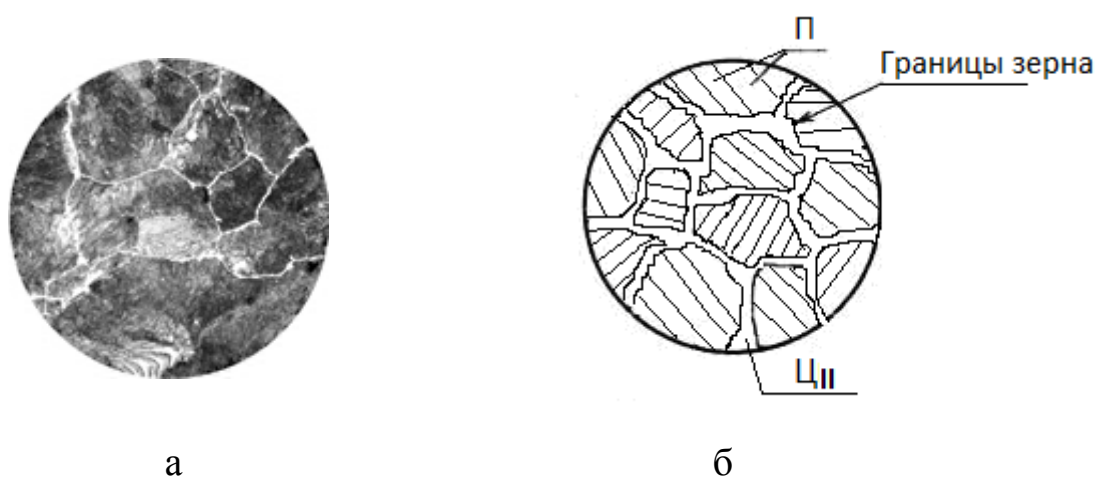


Рис. 4. А→П превращение: а – заэвтектоидная сталь У12 (1,2 % углерода).
Травитель: 3% р-р азотной кислоты в спирте. Обработка: отжиг. Твердость: 190 НВ.
Основа: Fe. Структурные составляющие: пластинчатый перлит и цементит вторичный; б – схема изображения заэвтектоидной стали

Микроструктура сталей зависит от формы фаз и их расположения под воздействием различных операций технологического процесса при изготовлении изделий (рис. 5 а, б).

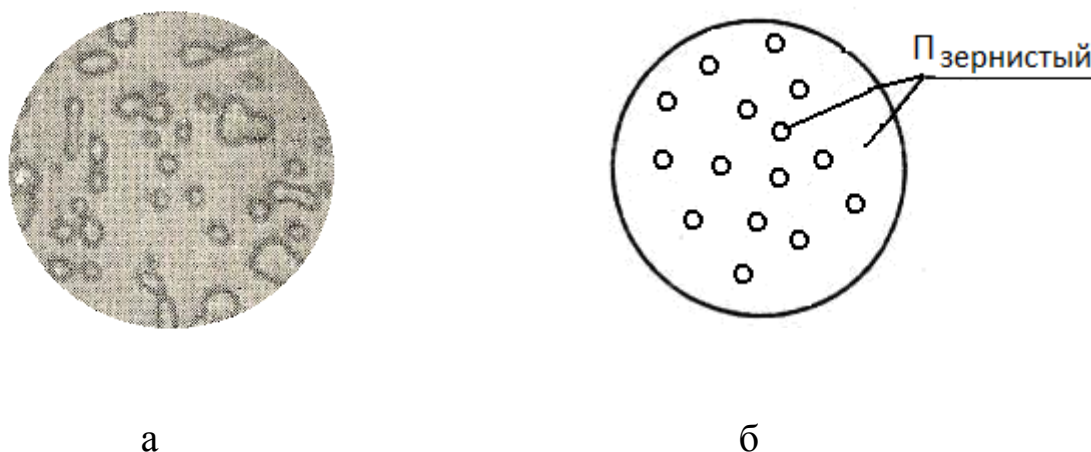


Рис. 5. А→П превращение: а – эвтектоидная сталь У8 (0,8 % углерода).

Травитель: 3% р-р азотной кислоты в спирте. Обработка: циклический отжиг. Основа: Fe. Структура зернистый перлит; б – схема изображения эвтектоидной стали

При циклическом отжиге происходит перекристаллизация в интервале температур не выше чем 10–30 °С выше линии PSR (727 °С) диаграммы железо–цементит, чтобы не получился перлит пластинчатый (см. приложение А). Структурой зернистого перлита должны обладать инструментальные стали, так как это обеспечивает обрабатываемость резанием, т. е. возможно применение больших скоростей резания и достижения высокой чистоты обрабатываемой поверхности. Наличие структуры зернистого перлита уменьшает склонность эвтектоидных и заэвтектоидных сталей к перегреву при закалке.

На структуру влияют параметры термической обработки: температура и время выдержки. Увеличение температуры до линии солидус на диаграмме железо–углерод (см. приложение А) приводит к перегреву. При **перегреве** увеличивается размер зерна аустенита. Последующее охлаждение у **дозэвтектоидных** сталей приводит к крупнозернистой перлитной структурной составляющей, в которой наблюдается игольчатое строение ферритной фазы [1, 2, 5, 8]. Такая структура называется **видманштеттова** (рис. 6 а, б).



Рис. 6. А→П превращение: а – доэвтектоидная сталь 40 (0,40 % углерода). Травитель: 3% р-р азотной кислоты в спирте. Основа: Fe. Перегрев. **Видманштеттова** структура; б – схема изображения структуры **Видманштеттова**

При закалке стали 45, при нагреве выше линии GS, на 30–50 °С диаграммы железо–цементит и быстром охлаждении в воде получаем структуру мартенсит закалки и остаточный аустенит. Мартенсит закалки имеет игольчатое строение (темные иглы на светлом фоне аустенитных зерен).

Мартенсит – пересыщенный твердый раствор углерода в альфа железе, имеет тетрагональную элементарную ячейку, образуется по сдвиговому механизму. Размер игл определяется величиной исходного (перед закалкой) зерна аустенита (рис. 7 б). При закалке в воде у углеродистых сталей происходит аустенитно-мартенситное превращение (А→М) при скорости охлаждения больше критической (рис. 12).

При нагреве доэвтектоидных сталей выше линии PSK, но ниже линии GS (диаграмма Fe-Fe₃C) с последующим быстрым охлаждением, получается структура, соответствующая неполной закалке (рис. 8 а, б). В этом случае не достигается цель закалки сталей (повышение твердости) из-за наличия ферритной структурной составляющей, имеющей низкую твердость по сравнению с мартенситом [1,2,5].

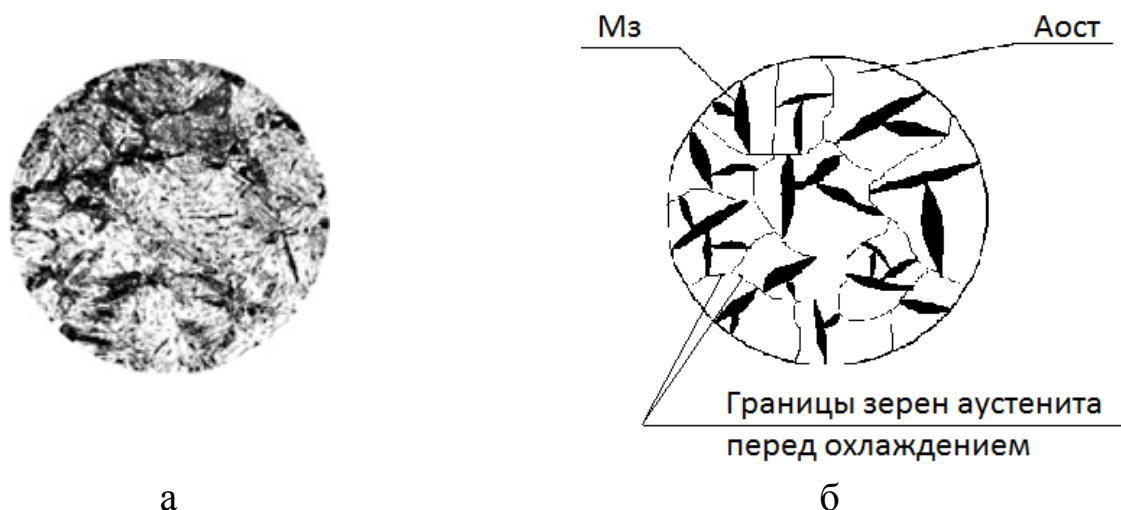


Рис. 7. А→М превращение: а – доэвтектоидная сталь 45 (0,45 % углерода). Травитель: 3% р-р азотной кислоты в спирте. Обработка: закалка с 850 °С в воду. Твердость: 541НВ, ГПа. Основа: Fe. Структурные составляющие: мартенсит закалки, аустенит остаточный; б – схема изображения доэвтектоидной углеродистой стали после закалки в воде

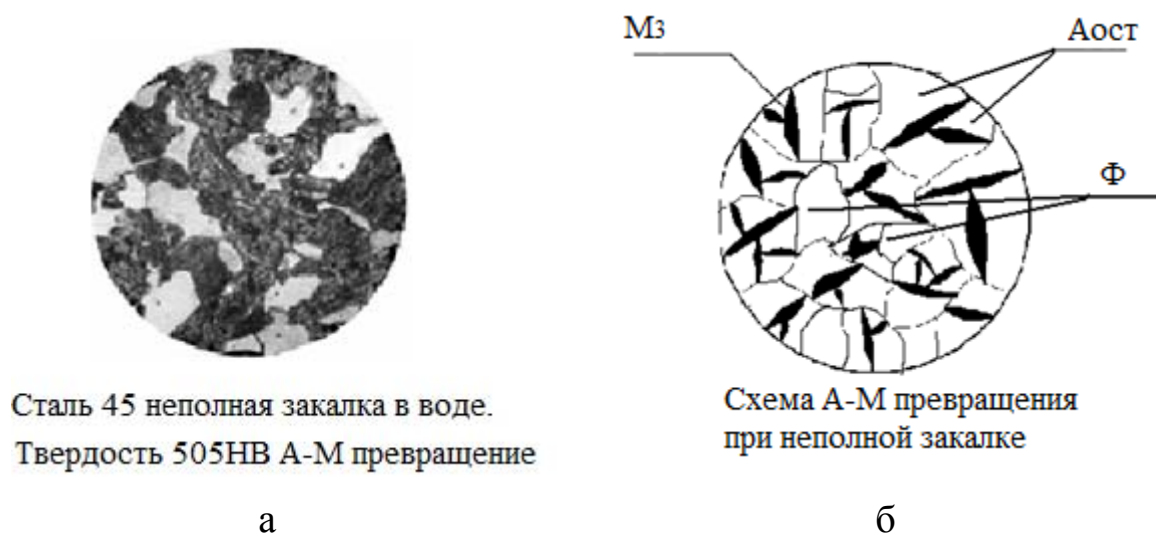


Рис. 8. а – доэвтектоидная сталь 45 (0,45 % углерода). Травитель: 3% р-р азотной кислоты в спирте. Обработка: неполная закалка с 750 °С в воду. Твердость: 505 НВ. Основа: Fe. Структурные составляющие: мартенсит закалки, аустенит остаточный, феррит; б – схема изображения доэвтектоидной углеродистой стали после неполной закалки в воде

Отпуск углеродистых и легированных сталей классифицируют по температурам:

- низкотемпературный отпуск (до 250 °С), которому подвергают режущий и измерительный инструмент из углеродистых и низколегированных сталей, а также детали после цементации. Микроструктура поверхности таких изделий – мартенсит отпуска;

- среднетемпературный (350–500 °С) применяют главным образом для пружин и рессор для обеспечения высокого предела упругости и выносливости.

При среднем отпуске мартенсит закалки претерпевает структурное М→П превращение, при котором образуется 2 фазы: зернистый цементит и феррит, расположение которых сохраняет ориентировку игольчатого мартенсита закалки (рис. 9 а, б).

Структура углеродистых сталей после среднего отпуска – зернистый троостит отпуска.

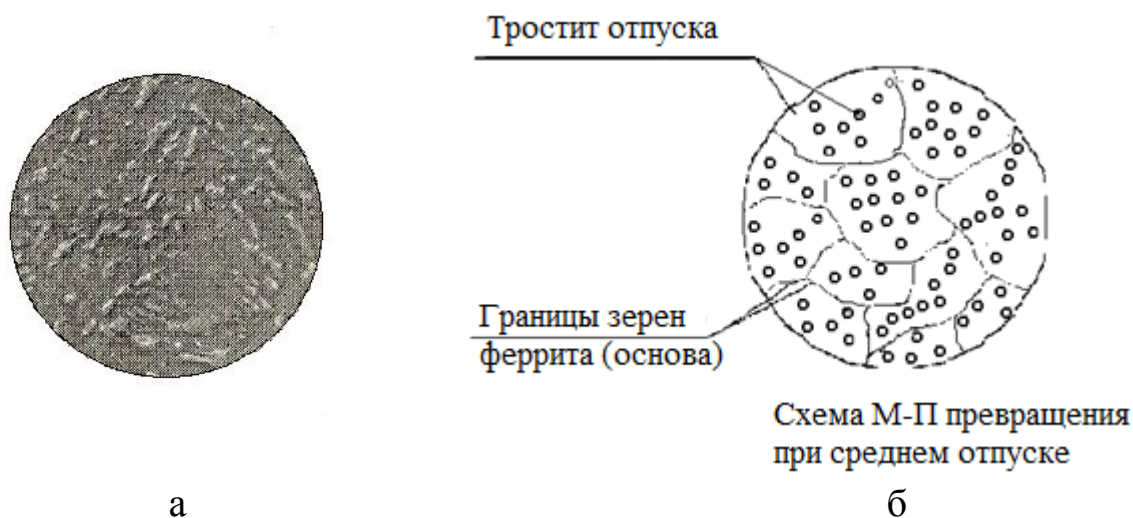


Рис. 9. М→П превращение: а – доэвтектоидная сталь 45 (0,45 % углерода). Травитель: 3% р-р азотной кислоты в спирте. Обработка: полная закалка в воде и отпуск средний. Структура – троостит отпуска; б – схема изображения троостита отпуска доэвтектоидной углеродистой стали после среднего отпуска

- высокотемпературный отпуск (500–680 °С) создает наилучшее соотношение прочности и вязкости у среднеуглеродистых сталей, содержащих 0,3–0,5 % углерода. Термическую обработку, состоящую из закалки и высокого отпуска, называют улучшением (термическим улучшением). Мартенсит закалки в результате М→П превращения распадается на 2 фазы: зернистый цементит и феррит, расположение которых сохраняет ориентировку игольчатого мартенсита закалки (рис. 10 а, б).

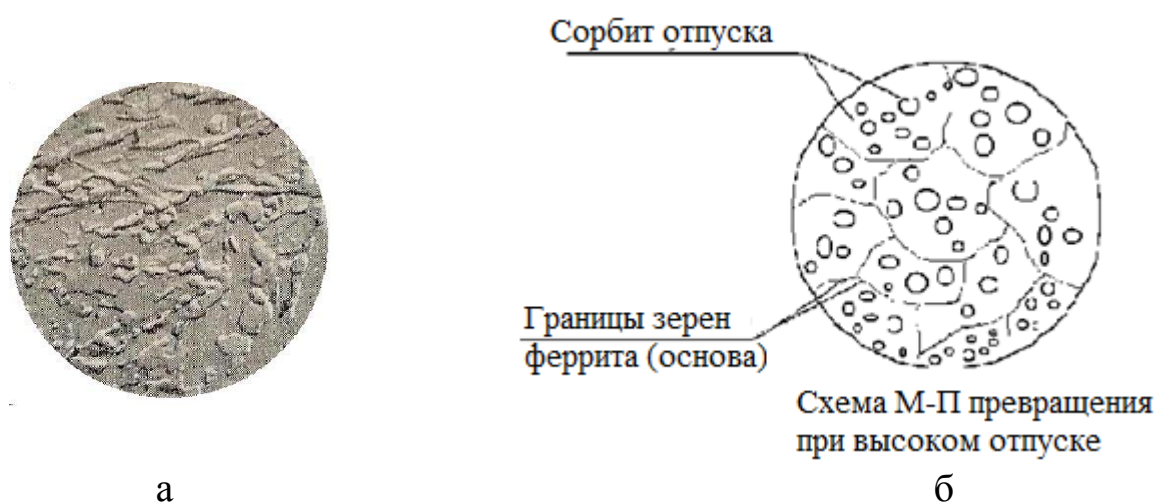


Рис. 10. М→П превращение: а – доэвтектоидная сталь 45 (0,45 % углерода). Травитель: 3% р-р азотной кислоты в спирте. Обработка: полная закалка в воде и отпуск высокий. Структура – сорбит отпуска; б – схема изображения сорбита отпуска доэвтектоидной углеродистой стали после среднего отпуска

3. Поверхностное легирование стальных изделий

Большинство деталей машин, изготовленных из сталей, работают в условиях изнашивания. Для повышения износостойкости трущихся поверхностей изделий применяют химико-термическую обработку (поверхностное легирование). При химико-термической обработке изменяется микроструктура по сечению стальных изделий от поверхности к сердцевине в результате диффузии насыщающего атомарного элемента вглубь металла. Насыщение поверхностного слоя стали в процессе выдержки при определенной температуре в активной атомарной среде (жидкой, газооб-

разной или твердой) осуществляют наиболее широко в промышленности неметаллами (углеродом, азотом, бором, кремнием, фосфором и др.), а также металлами (хромом, алюминием и др.). В зависимости от типа диффундирующего элемента различают процессы химико-термической обработки: цементация (насыщение углеродом), азотирование (насыщение азотом), хромирование (насыщение хромом), алитирование (насыщение алюминием). После всех процессов химико-термической обработки химический состав поверхности отличается от химического состава стали, из которой изготовлено изделие, а, следовательно, изменяется структура стали по сечению (рис. 11 а, б). Например, после цементации насыщенный слой имеет переменную концентрацию углерода по толщине, убывающую от поверхности к сердцевине детали. На рисунке 11 а, б показано, что микроструктура углеродистой стали 20 (0,20 % С) после цементации при температуре 950 °С и медленного охлаждения состоит из трех зон:

- заэвтектоидную, состоящую из перлита и цементита вторичного, образующего сетку по бывшему зерну аустенита (поверхность, которой соответствует содержание углерода более 0,8 %);
- эвтектоидную, состоящую из пластинчатого перлита (переходную, которой соответствует содержание углерода = 0,8 %);
- доэвтектоидную, состоящую из перлита и феррита (структура основного металла изделия, которой соответствует содержание углерода 0,2 %).

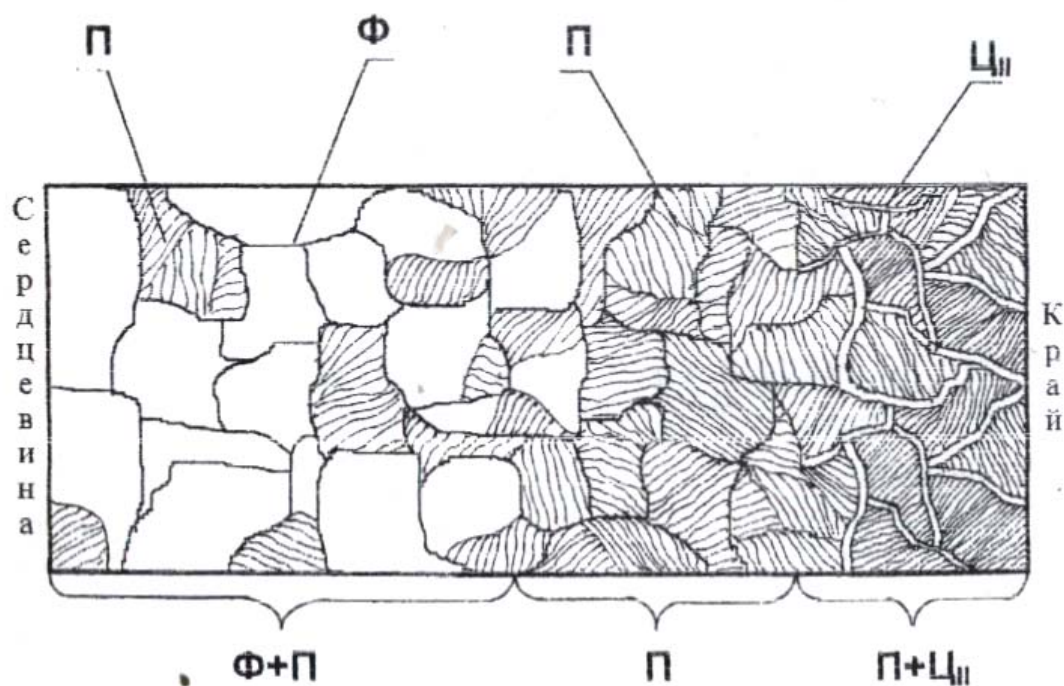
Количество феррита возрастает по мере приближения к сердцевине (рис. 11 а, б).

Для получения необходимых эксплуатационных свойств цементованного слоя после цементации проводят закалку и низкотемпературный отпуск. В результате такой обработки поверхностный слой приобретает микроструктуру мартенсит отпуска с мелкими включениями карбидов и твердость 60–62 HRC, сердцевина 35–38 HRC. Цементации подвергают изделия из низкоуглеродистых сталей, содержащих 0,1–0,2 % углерода, но чаще с добавлением легирующих элементов. Для цементации крупнога-

баритных деталей используют стали с более высоким содержанием углерода 0,2–0,3 %. Выбор таких сталей необходим для того, чтобы сердцевина изделия, не насыщающаяся углеродом сохраняла достаточную твердость и вязкость после заковки [1, 2, 5].



а



б

Рис. 11. а – микроструктура цементованного слоя после медленного охлаждения с температуры цементации (сталь 20 после цементации до заковки); б – схема цементованного слоя после медленного охлаждения с температуры цементации

4. Легированные стали

Основа легированных – сталей сплавы системы железо–углерод с содержанием углерода до 2,14 % (углеродистые стали). Легирование углеродистых сталей влияет на их свойства.

В легированных сталях образуются все типы соединений компонентов в сталях (твердые растворы, химические соединения, механические смеси).

Промышленные легированные стали являются многокомпонентными системами, в которых содержание легирующих компонентов (элементов) может быть больше 1 (макролегирование) или меньше 1 (микролегирование, т. е. сотых и тысячных долей %). [1, 2, 6, 10]

Для получения требуемых эксплуатационных и технологических свойств изделий в углеродистые стали вводят легирующие элементы, усложняющие ее химический состав и изменяющие микроструктуру.

Все легирующие элементы, которые растворяются в железе, влияют на температурный интервал существования полиморфного (аллотропического) превращения и растворимость углерода в железе. Легирующие элементы, взаимодействуя с железом, углеродом и между собой, могут образовывать три вида соединений (твердые растворы, химические соединения, механические смеси) [5, 6].

В качестве легирующих элементов чаще всего используют сравнительно недорогие и недефицитные элементы: марганец, кремний, хром. Стали, содержащие эти элементы, нередко добавочно, легируют титаном, ванадием, бором и другими элементами. Для изготовления высоконагруженных деталей стали легируют более дорогими и дефицитными элементами, такими как никель, молибден, вольфрам, ниобий, кобальт. Чем больше легирующих элементов, тем меньше размеры изделия и больше стоимость [8].

5. Классификация легированных сталей

Легированные стали классифицируют:

По суммарному содержанию легирующих элементов:

- не более 2,5 % – низколегированные;
- 2,5–10 % – легированные;
- более 10 % – высоколегированные.

В этих группах сталей классификационным признаком является наличие тех или иных легирующих элементов. Например, сталь с 2,0 % марганца является легированной марганцовистой сталью (14Г2). 14Г2 содержит углерода 0,14 %, 2 % Mn, остальное железо.

По структуре легированные стали:

- после охлаждения на воздухе (нормализации);
- по равновесной структуре (после отжига).

После охлаждения на спокойном воздухе (нормализации) выделяют три основных класса сталей: **перлитный, мартенситный, аустенитный.**

Наличие трех классов обусловлено тем, что по мере увеличения содержания легирующих элементов устойчивость аустенита в перлитной области возрастает, а температурная область мартенситного превращения понижается ($A \rightarrow M$).

Для сталей перлитного класса характерно относительно малое содержание легирующих элементов. Согласно термокинетической диаграмме у легированных сталей перлитного класса (как и для углеродистых) скорость охлаждения на воздухе будет пересекать область перлитного распада аустенита и будут получаться двухфазные структуры в результате $A \rightarrow P$ превращения (рис. 12).

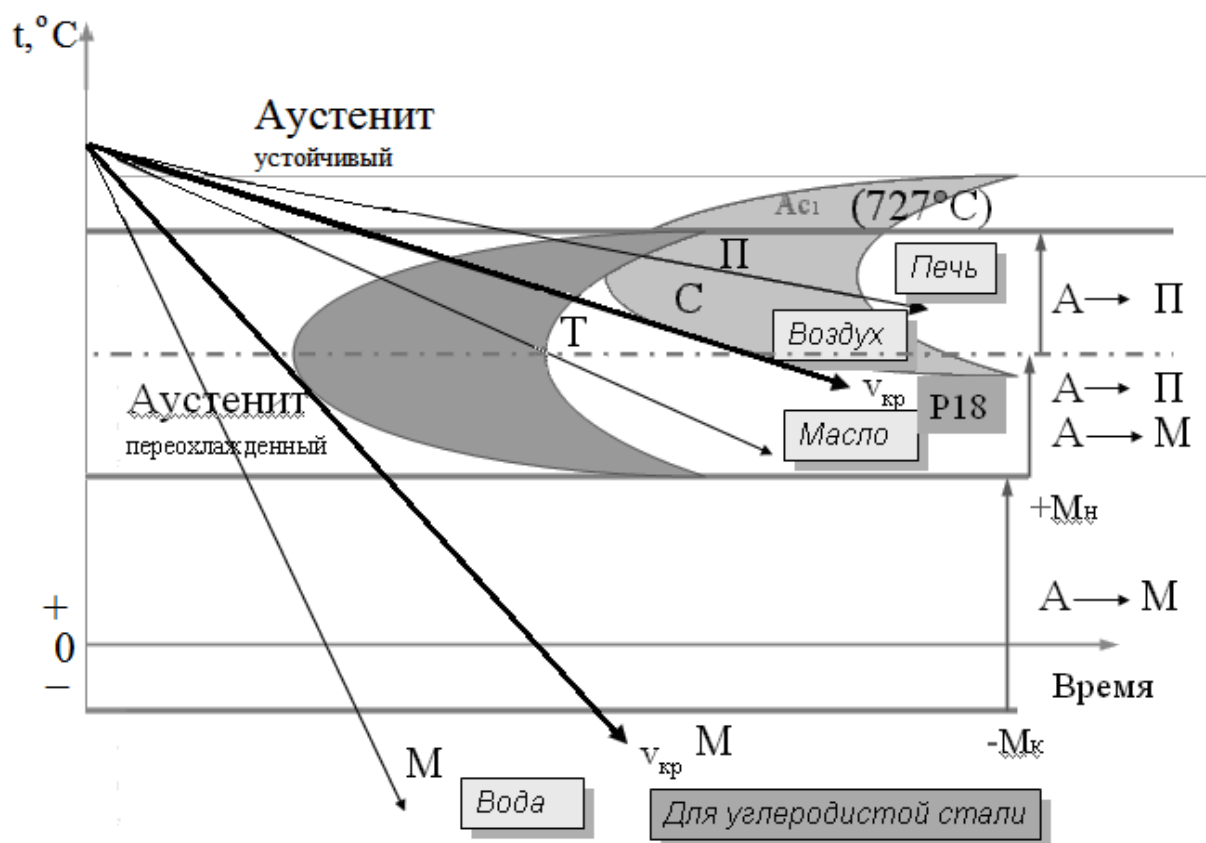


Рис. 12. Схема влияния легирующих элементов и скорости непрерывного охлаждения аустенита на характер образующихся продуктов превращения в сталях (P18, углеродистых)

У сталей мартенситного класса область перлитного распада ($A \rightarrow П$) сдвигается вправо (рис. 12). Поэтому при охлаждении на воздухе аустенит переохлаждается без распада до температур мартенситного превращения ($A \rightarrow M$). В результате сталь имеет мартенситную структуру. Быстрорежущие стали, закаленные на воздухе, относятся к мартенситному классу. На рис. 12 показано смещение вправо критической скорости стали P18, которая имеет мартенситную структурную составляющую после закалки на воздухе.

Дальнейшее увеличение содержания углерода и легирующих элементов не только сдвигает область перлитного превращения вправо, но и снижает температуру мартенситного превращения в область отрицатель-

ных температур. В этом случае сталь будет иметь микроструктуру аустенита после охлаждения на воздухе до 20 °С.

Следует отметить, что рассмотренная классификация условна и относится к случаю охлаждения на воздухе образцов относительно небольших размеров.

По равновесной структуре (после отжига) различают:

- доэвтектоидные, имеющие в структуре избыточный феррит;
- эвтектоидные, имеющие перлитную структуру;
- заэвтектоидные, имеющие в структуре избыточные (вторичные)

карбиды;

– ледебуритные, имеющие в структуре первичные карбиды, выделившиеся из жидкой фазы. При охлаждении стальных отливок до температуры полиморфного превращения в микроструктуре наблюдается ледебуритная эвтектика, состоящая из первичных карбидов и аустенита, а после полиморфного превращения – из сорбитообразного перлита и первичных карбидов (рис. 13).

Ледебуритная эвтектика (рис. 13) образуется после литья в микроструктуре всех быстрорежущих и легированных штамповых инструментальных сталях для холодного деформирования металла (X12М, X12Ф, X12–высокохромистые стали имеют среднее содержание 12 % хрома и углерода 1–1,5 %).

Высокохромистые стали по своей природе типа X12 похожи на быстрорежущие, так как в них идут однотипные превращения [3, 5, 6].

6. Быстрорежущие стали

Изделия из быстрорежущей стали изготавливаются традиционными металлургическими приемами: разливкой в слитки и последующей ковкой заготовки. Готовые изделия подвергают термообработке [3]. Составы широко применяемых быстрорежущих сталей приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1

Химический состав характерных теплостойких инструментальных сталей (быстрорежущих)

Сталь	Содержание основных элементов, %					
	C	Cr	W	Mo	V	Co
<i>Умеренной теплостойкости</i>						
P18	0,7 – 0,8	3,8 – 4,4	17 – 18,5	До 1	1 – 1,4	-
P9	0,85 – 0,95	3,8 – 4,4	8,5 – 10	« 1	2 – 2,6	-
P12	0,8 – 0,9	3,1 – 3,6	12 – 13	« 1	1,5 – 1,9	-
P6M5	0,80 – 0,88	3,8 – 4,4	5,5 – 6,5	5 – 5,5	1,7 – 2,1	-
P6M3	0,85 – 0,95	3 – 3,5	5,5 – 6,5	3 – 3,6	2 – 2,5	-
P8M3 (ЭП856)	0,8 – 0,9	3,3 – 3,9	7,6 – 8,4	3 – 3,5	1,6 – 1,9	-
<i>Повышенной теплостойкости</i>						
P6M5K5	0,82 – 0,9	3,8 – 4,3	6 – 7	4,8 – 5,8	1,7 – 2,2	4,8 – 5,3
P9M4K8	1 – 1,1	3 – 3,6	8,5 – 9,6	3,8 – 4,3	2,1 – 2,5	7,5 – 8,5
P8M3K6C (ЭП722)	1,5 – 1,13	3,5 – 4	8 – 9,5	3,4 – 4,4	1,5 – 1,9	5,7 – 6,7
P12Φ4K5 (ЭП600)	1,25 – 1,35	3,5 – 4	12,5 – 14	До 1	3,2 – 3,8	5 – 6
P12Φ2K8M 3 (ЭП657)	0,95 – 1,05	3,8 – 4,4	11 – 13	2,8 – 3,4	1,8 – 2,4	7,5 – 8,5
10P8M3 (ЭП716)	0,96 – 1,06	3,3 – 3,9	7,5 – 8,5	3 – 3,8	1,7 – 2,1	-
P12Φ3 (ЭП597)	0,94 – 1,04	3,5 – 4	12,5 – 13,5	До 1	2,5 – 3	-
<i>Высокой теплостойкости</i>						
B11M7K23 (ЭП831)	0,05 – 0,15	До 0,5	10,5 – 12	7 – 8	0,4 – 0,8	22,5 – 24

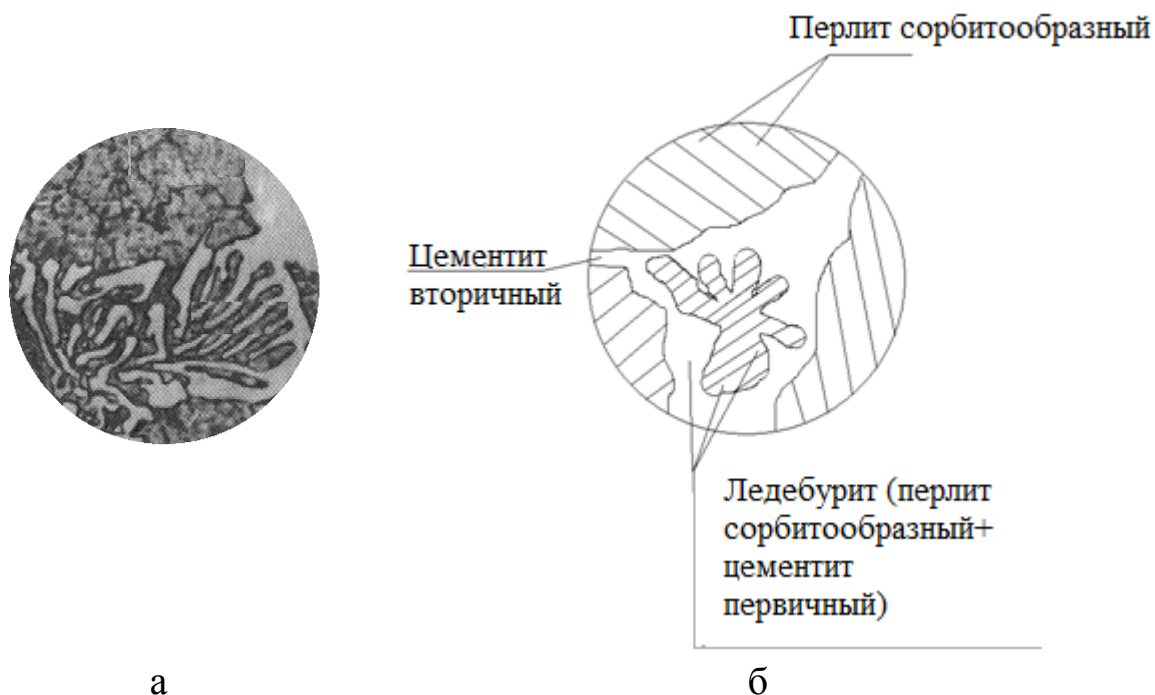


Рис. 13. А→П превращение: Структура быстрорежущей стали;
а – после литья; б – схема структуры

- Система: Fe-C-W-Cr-V-Mo
- Компоненты: Fe, C, W, Cr, V, Mo
- Структура: ледебурит+перлит сорбитообразный+вторичные карбиды
- Виды соединений в структуре: механические смеси и химические соединения
- Фазы: Феррит+карбиды легирующих элементов
- Виды соединений в фазах: твердый раствор и химические соединения
- Скорость охлаждения $V < V_{кр}$ (остывает отливка)
- Структура характерна для литых быстрорежущих сталей

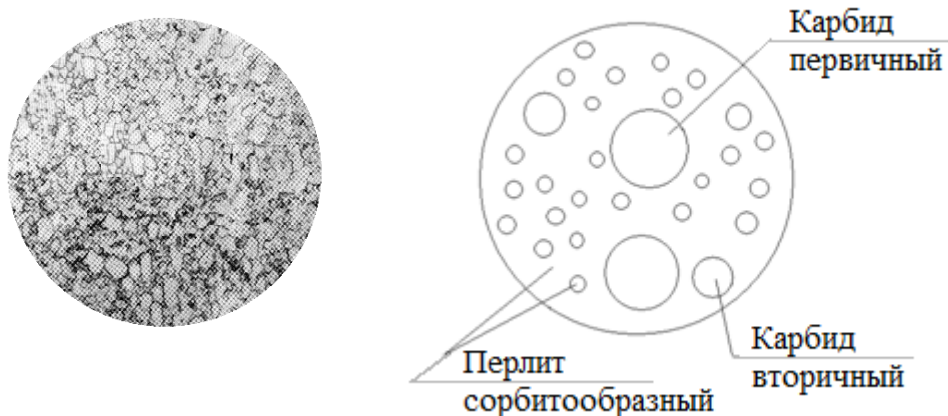


Рис. 14. А→П превращение: Структура быстрорежущей стали послековки и отжига отливки

- Система: Fe-C-W-Cr-V-Mo
- Компоненты: Fe, C, W, Cr, V, Mo
- Структура: зернистый сорбитообразный перлит
- Вид соединения в структуре: механическая смесь
- Фазы: Феррит+ карбиды
- Виды соединений в фазах: твердый раствор и химические соединения.
- Структура характерна для сплавов после обработки давлением и последующего отжига



Рис. 15. А→М превращение: Микроструктура быстрорежущей стали:
а – после закалки на воздухе; б – схема структуры

- Система: Fe-C-W-Cr-V-Mo
- Компоненты: Fe, C, W, Cr, V, Mo
- Структура: мартенсит высоколегированный + карбиды первичные и вторичные
- Виды соединений в структуре: пересыщенный твердый раствор, химические соединения
- Фазы: мартенсит + карбиды
- Виды соединений в фазах: химические соединения, пересыщенный твердый раствор, раствор углерода и легирующих элементов в альфа железе
- Структура характерна для высоколегированных сталей после закалки на воздухе

Таблица 6.2

Температуры закалки быстрорежущих сталей умеренной теплостойкости

Инструменты	Температура нагрева сталей, °С				Балл зерна	Твердость HRC после отпуска при 560 °С
	P6M5, P6M3	P8M3	P18	P12		
Крупные сверла и резцы	1220–1240	1230–1245	1280–1300	1245–1255	10 – 8,5	60– 61
Остальные режущие инструменты	1210–1230	1215–1235	1270–1290	1225–1245	10,5–9,5	59–60
Штампы (прессования)	1180–1200	1180–1200	1240–1260	1200–1220	12	56–57

Таблица 6.3

Температуры закалки быстрорежущих сталей повышенной и высокой теплостойкости (для получения зерна балла 11)

Сталь	Температура закалки, °С	Твердость HRC после отпуска при 560 °С, 3 раза
Стали повышенной теплостойкости		
<i>а) с повышенным углеродом</i>		
10P8M3	1200 – 1215	65 – 66,5
<i>б) с повышенным ванадием</i>		
P12Ф3	1235 – 1250	64,5 – 66
<i>в) кобальтовые</i>		
P9M4K8	1215 – 1235	67 – 69
P12Ф4K5	1235 – 1250	65 – 66,5
P8M3K6C	1200 – 1220	68 – 70
P12Ф2K8M3	1220 – 1260	66 – 67
Сталь высокой теплостойкости, отпуск 600 °С, 1 раз		
B11M7K23	1260 – 1280	67,5 – 69

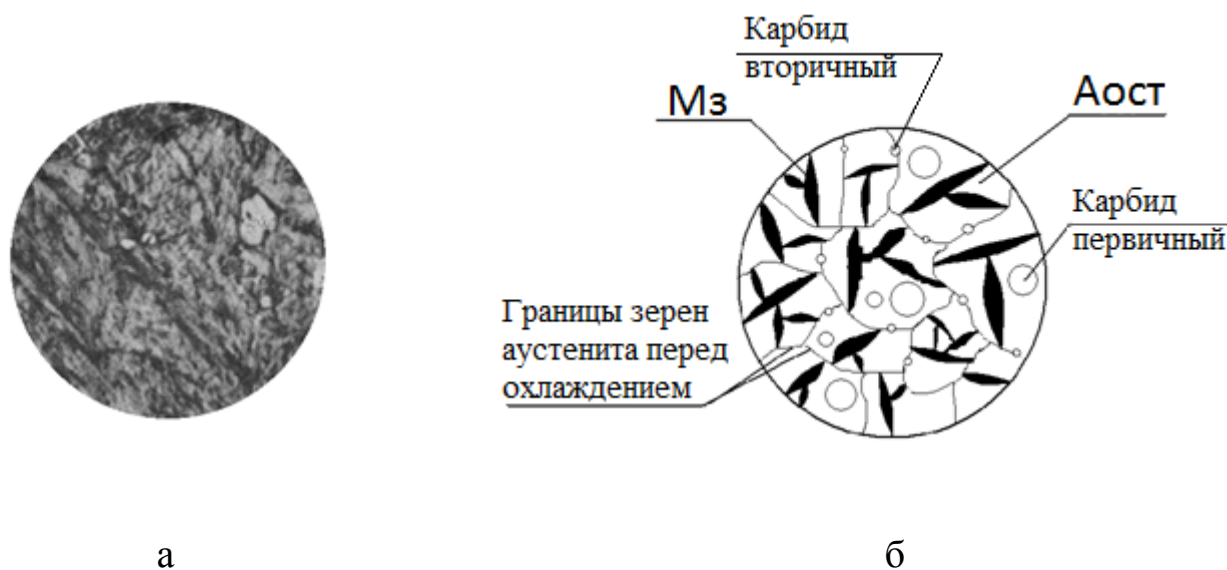


Рис. 16. Микроструктура быстрорежущей стали: а – после закалки и однократного отпуска (см. технологическую схему рис. 19); б – схема структуры

- Система: Fe-C-W-Cr-V-Mo
- Компоненты: Fe, C, W, Cr, V, Mo.
- Структура: мартенсит закалки + переохлажденный остаточный аустенит + карбиды первичные и вторичные
- Виды соединений в структуре: пересыщенный твердый раствор, твердый раствор и химические соединения
- Фазы: мартенсит+аустенит+карбиды
- Виды соединений в фазах: химические соединения, пересыщенный твердый раствор углерода и легирующих элементов в альфа железе со степенью тетрагональности больше 1 и твердый раствор углерода и легирующих элементов в гамма железе.
- Структура характерна после закалки на воздухе и однократного высокого отпуска при 560 °С в течение 1 часа.

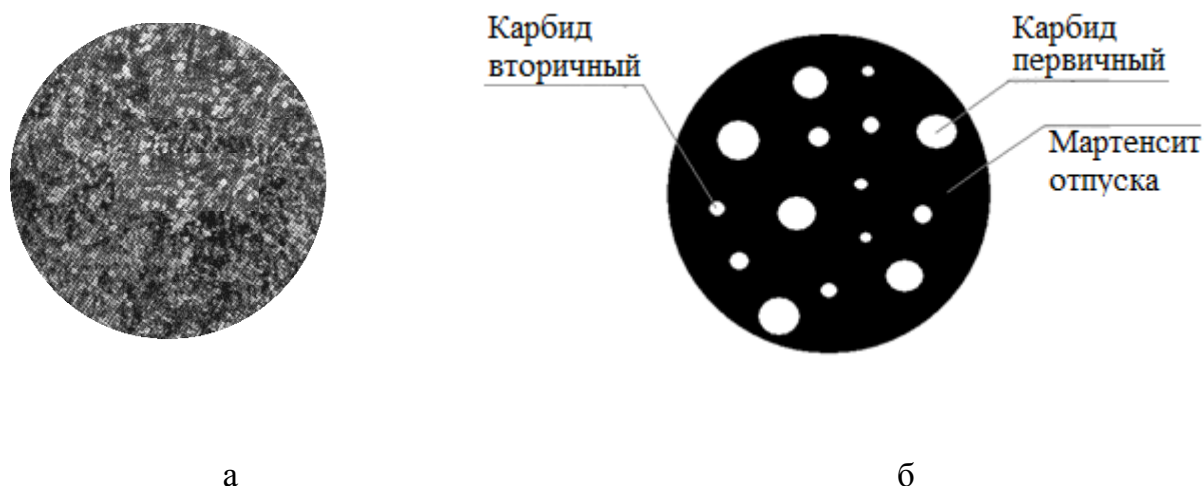


Рис. 17. Микроструктура быстрорежущей стали: а - закаленная и трехкратно отпущенная (см. технологическую схему рис. 18, 19); б – схема структуры

- Система: Fe-C-W-Cr-V-Mo
- Компоненты: Fe, C, W, Cr, V, Mo
- Структура: мартенсит отпуска + карбиды первичные и вторичные
- Виды соединений в структуре: пересыщенный твердый раствор углерода и легирующих элементов в альфа железе со степенью тетрагональности равной 1 и химические соединения
- Фазы: мартенсит+карбиды
- Виды соединений: химические соединения и пересыщенный твердый раствор углерода и легирующих элементов в альфа железе.
- Структура характерна после закалки на воздухе и трехкратного высокого отпуска или обработки холодом и однократного отпуска

Карбидная ликвация



Балл 3



Балл 2



Балл 1

Рис.18. Эталон микроструктуры стали по ГОСТ 8233 (степень карбидной неоднородности)

Для инструментальных сталей ледебуритного класса большое значение имеет распределение карбидной фазы. Качество быстрорежущей стали в значительной степени определяется степенью ее прокованности (рис. 14).

При недостаточной проковке наблюдается карбидная ликвация, представляющая собой остатки участков ледебуритной эвтектики не раздробленных при ковке (рис. 18). Карбидная ликвация снижает стойкость инструмента, так как повышается хрупкость. Чем больше операций при ковке во взаимно перпендикулярных направлениях, тем сильнее дробится ледебуритная эвтектика и равномернее распределяются карбиды в микроструктуре. Для оценки микроструктуры быстрорежущих сталей по ГОСТ 8233 рекомендуется эталон, характеризующий степень карбидной неоднородности (рис. 18).

На рис. 19, 20 по горизонтальной оси показана величина остаточного аустенита (% A) в зависимости от количества проведенных отпусков и их влияние его на твердость стали P18. При высоком отпуске остаточный аустенит превращается в мартенсит, т. е. идет $A \rightarrow M$ превращение.

Таким образом, проявляется особенность превращений при отпуске высоколегированных сталей в отличие от превращений при отпуске углеродистых сталей, для которых требуется один отпуск для получения мартенситной структуры.

Высокая температура закалки быстрорежущей стали необходима для полного растворения вторичных карбидов и частично первичных в аустените высоколегированном хромом, вольфрамом, молибденом ванадием. Микроструктура после закалки, быстрорежущей стали высоколегированный мартенсит (не травящийся), обладающий высокой теплостойкостью. Карбиды, не растворившиеся в аустените, располагаются в центре и по границам зерен аустенита. В результате обеспечивается мелкое зерно мартенсита после закалки (рис. 15) [3, 6].

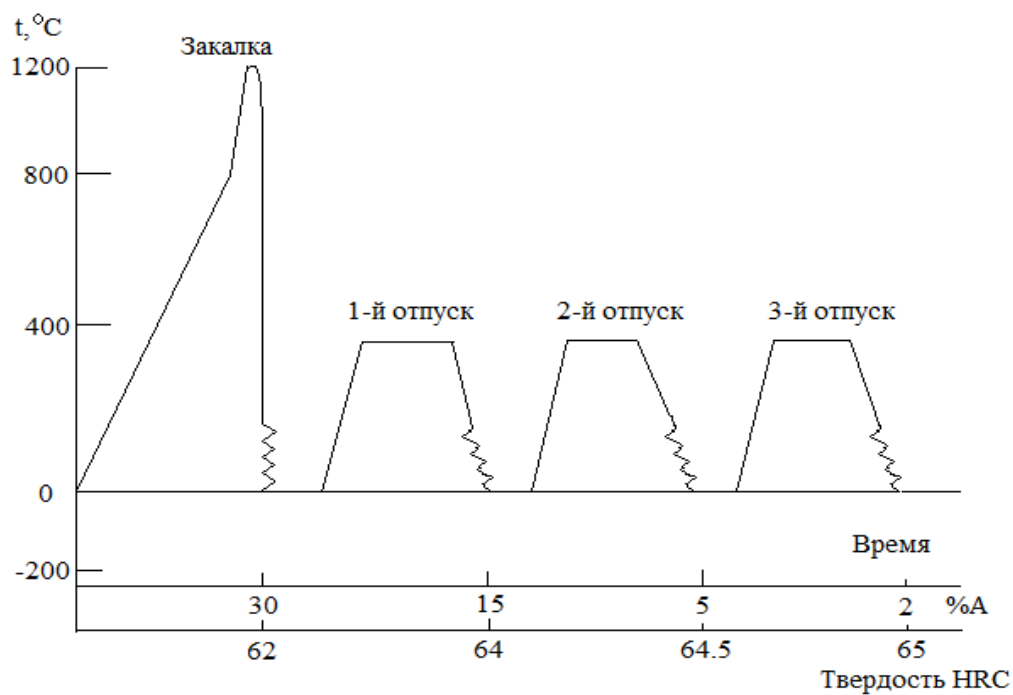


Рис. 19. Технологическая схема термической обработки быстрорежущей стали (типичный режим). Все три отпуска высокотемпературные (560 °C в течение 1 часа каждый). А – % остаточного аустенита

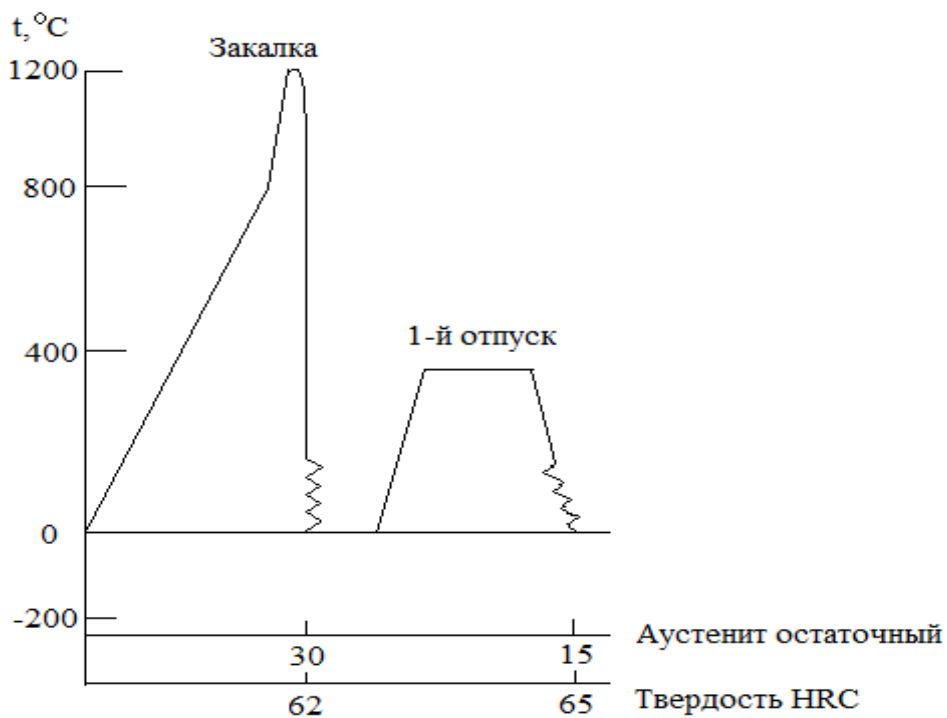


Рис. 20. Технологическая схема термической обработки быстрорежущей стали с обработкой холодом и высокотемпературным отпуском при 560 °C в течении 1 часа

7. Микроструктура холоднодеформированной и рекристаллизованной стали

Основные элементы структуры углеродистых сталей – феррит и перлит. Объемная доля перлита в сталях зависит от содержания углерода. Для определения доли перлита в углеродистых сталях пользуются равновесной диаграммой железо–углерод (см. приложение А). Известно, что при концентрации углерода, соответствующей точке Р на диаграмме, доля перлита равна нулю, а точке S–100 % перлита. Таким образом, используя выше приведенное соотношение, можно объяснить, что перлитная структурная составляющая при металлографическом исследовании качественных конструкционных малоуглеродистых сталей (05, 08) после отжига представляет собой темные точки по границам зерен равноосного феррита (рис. 21).

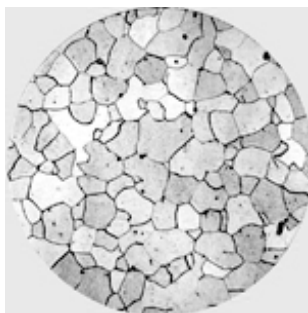


Рис. 21. Микроструктура стали 05 после отжига.

Травитель: 3 % раствор азотной кислоты в спирте. Твердость 106 НВ. Основа: Fe.
Компоненты: Fe и 0,05 % углерода. Структурные составляющие: феррит (светлый),
перлит (темные точки на стыках зерен феррита)

Листовые стали 05, 08 применяют для холодной штамповки. Штампуемость зависит от величины зерен феррита. При мелком зерне обнаруживается пружинящий эффект и сильно изнашивается инструмент (штамп). При крупном зерне образуется шероховатая поверхность («апельсиновая корка») и разрывы. Рекомендуется сталь с 6–8 баллом зерна по ГОСТ 8233. Сталь – эталоны микроструктуры [4].

Пластическая деформация вносит существенные изменения в структуру сталей. Микроструктура штампуемых сталей на разных стадиях изготовления изделий зависит от степени деформации. Свойства стали зависят также от степени деформации, т. к. происходит упрочнение металла (наклеп). Изменение формы стальных деталей при обработке давлением происходит в результате пластической деформации каждого зерна. Плоскости и направления скольжения в каждом зерне различные. При увеличении внешней силы первоначально начинается скольжение в наиболее благоприятно ориентированных зернах, где достигнуто критическое касательное напряжение. Под микроскопом наблюдаются следы деформации – полосы (линии) сдвига в отдельных зернах (рис. 22).

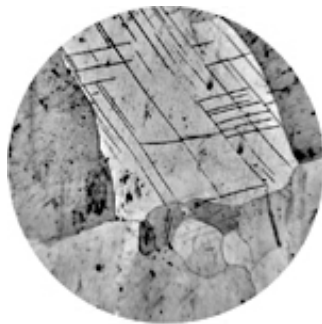


Рис. 22. Микроструктура стали 05 после обжатия 5 %.

Травитель: 3 % раствор азотной кислоты в спирте. Твердость 112 НВ. Основа: Fe. Компоненты: Fe и 0,05 % углерода. Линии сдвига в зерне феррита, по плоскостям легчайшего сдвига в направлении касательных напряжений

При увеличении степени деформации в результате скольжения зерна меняют свою форму. В результате смещения по плоскостям скольжения зерна вытягиваются (рис. 23, 24).

За счет наклепа повышается твердость. Способность к пластической деформации уменьшается.

При очень больших степенях деформации (80–90 %) возникает преимущественная ориентировка кристаллографических плоскостей и направлений в зернах – текстура деформации. Зерна получают вытянутую форму в направлении наиболее интенсивного течения металла (поворачиваются осями наибольшей прочности) (рис. 24). Кристаллографическую

текстуру нельзя отождествлять с волокнистой структурой, которая может не сопровождаться текстурой.

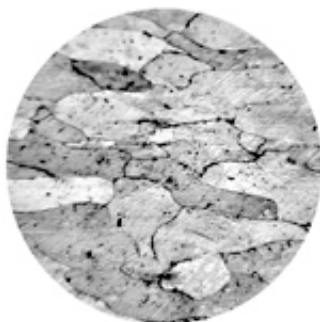


Рис. 23. Микроструктура стали 05 после обжатия 30 %.

Травитель: 3 % раствор азотной кислоты в спирте. Твердость 136 НВ. Основа: Fe.

Компоненты: Fe и 0,05 % углерода. Зерна феррита сжаты

Образование текстуры способствует появлению анизотропии механических и физических свойств стали [1, 2, 6].

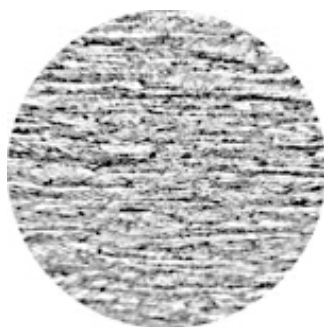


Рис. 24. Микроструктура стали 05 после обжатия 80 %. Травитель: 3 % раствор азотной кислоты в спирте. Твердость 210 НВ. Основа: Fe. Компоненты: Fe и 0,05 % углерода. Зерна феррита сжаты и вытянуты в направлении течения материала

При необходимости продолжить обработку давлением (волочение, холодная прокатка и т. п.) восстанавливают структуру и свойства наклепанного металла рекристаллизационным отжигом. При нагреве наклепанной стали имеет важное практическое значение температура рекристаллизации. Чем больше степень предшествующей деформации, больше искажена структура, тем менее она устойчива, тем больше ее стремление перейти в более устойчивое состояние [10]. Таким образом, увеличение степени деформации способствует снижению температуры рекристаллиза-

ции. По правилу А.А. Бочвара температура рекристаллизации определяется соотношением

$$T_{\text{рек}} = \alpha \cdot T,$$

где α – безразмерный коэффициент, учитывающий чистоту металла и степень деформации; T – температура плавления сплава в градусах по Кельвину.

Коэффициент α для чистых металлов, подвергнутых деформации со степенью 80–90 %, равен 0,1–0,2, для технически чистых – он увеличивается до 0,3–0,4, а на базе твердых растворов до 0,5–0,6.

Скорость рекристаллизации, полнота снятия наклепа зависят от температуры отжига при одной и той же степени деформации (рис. 25, 26, 27).

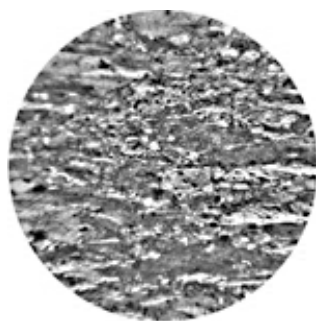


Рис. 25. Микроструктура стали 05 после обжатия 80 % и отжига при 550 °С. Травитель: 3 % раствор азотной кислоты в спирте. Твердость 109 НВ. Основа: Fe. Компоненты: Fe и 0,05 % углерода. Среди темных сжатых деформированных зерен наблюдаются мелкие светлые равноосные зерна. Начало первичной рекристаллизации

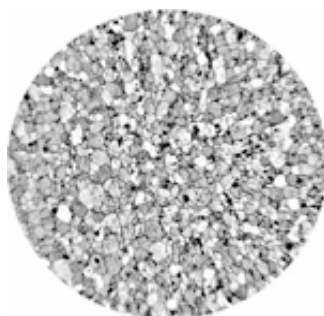


Рис. 26. Микроструктура стали 05 после обжатия 80 % и отжига при 600 °С. Травитель: 3 % раствор азотной кислоты в спирте. Твердость 106 НВ. Основа: Fe. Компоненты: Fe и 0,05 % углерода. Мелкие равноосные зерна (темные – перлита, светлые – феррита). Первичная рекристаллизация закончилась

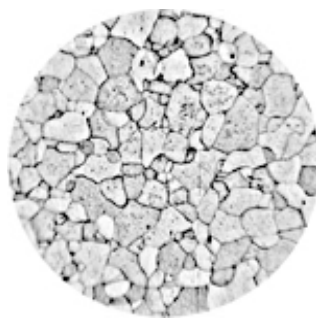


Рис. 27. Микроструктура стали 05 после обжатия 80 % и отжига при 700 °С
Травитель: 3 % раствор азотной кислоты в спирте. Твердость 104 НВ. Основа: Fe.
Компоненты: Fe и 0,05 % углерода. Равноосные зерна светлые (феррита), темные
мелкие (перлита). Результат собирательной рекристаллизации. Микроструктура не
отличается от отожженной недеформированной стали (рис. 21)

РАВНОВЕСНАЯ ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

Структура железоуглеродистых сплавов в зависимости от состава и температуры описывается диаграммой Fe-Fe₃C (рис. А. 1). В пределах от 0 до 6,67 % (линия АСД) наблюдается неограниченная растворимость углерода в расплавленном железе (жидкая фаза – Ж). В твердом состоянии растворимость углерода ограничена и существенно зависит от того, с какой кристаллической ячейкой существует железо. От комнатной температуры 20 °С до 911 °С железо имеет объемноцентрированную кубическую ячейку (ОЦК). При 911 °С происходит полиморфное превращение: при этой температуре ОЦК ячейка переходит в гранецентрированную кубическую (ГЦК). От 20 до 768 °С (точка Кюри железа) железо магнитно, но кристаллическая ячейка ОЦК при этом не меняется.

Температуры полиморфного и магнитного превращений железа являются критическими точками.

Углерод в углеродистых сталях взаимодействует с железом и образует следующие фазы:

Аустенит (А) – твердый раствор внедрения углерода в гамма железе. Основа растворителя – ГЦК ячейка. Максимальная растворимость углерода в гамма железе равна 2,14 % при температуре 1147 °С (т. Е на рис. А. 1).

Феррит (Ф) – твердый раствор внедрения углерода в альфа железе. Основа растворителя ОЦК ячейка. Максимальная растворимость углерода в альфа железе при 727 °С равна 0,025 % (т. Р на рис. А.1). Минимальная растворимость углерода в альфа железе при 20 °С равна 0,006 %.

Цементит (Ц) – химическое соединение железа с углеродом (Fe₃C) содержит 6,67 %, имеет сложную орторомбическую кристаллическую ячейку, которая отличается от ячеек Fe и C.

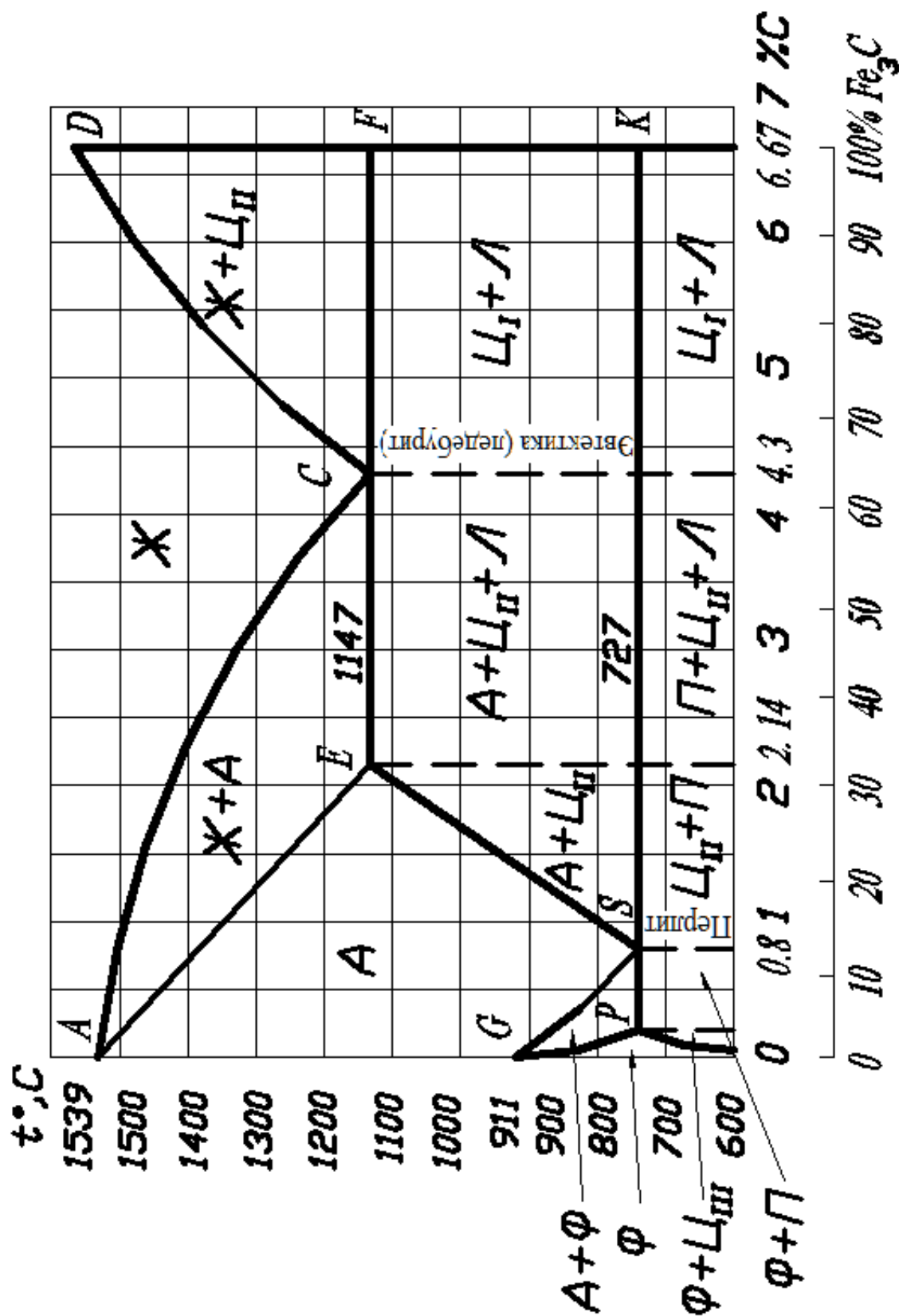


Рис. А.1. Диаграмма железо-цементит (Fe-Fe₃C)

Каждая точка диаграммы состояния системы **Fe–Fe₃C** характеризует строго определенный состав сплава при соответствующей температуре. Сплав проводится через критическую точку перпендикулярно оси химического состава. Совокупность критических точек называется критической линией.

В зависимости от условий образования различают следующие структурные составляющие в железоуглеродистых сплавах:

1) **первичный цементит**, который кристаллизуется из жидкой (**Ж**) фазы ниже линии CD (линия ликвидус) до температуры 1147 °С у железоуглеродистых сплавов (чугунов).

2) **вторичный цементит** выделяется из аустенитной (**А**) фазы ниже линии SE в интервале температур от 1147 °С до 727 °С у всех железоуглеродистых сплавов, содержащих углерода более 0,8 % (в заэвтектоидных сталях и чугунах).

3) **третичный цементит** выделяется из феррита в интервале температур от 727 °С до 20 °С ниже линии растворимости у всех железоуглеродистых сплавов, содержащих углерода более 0,006 % (технически чистом железе, сталях и чугунах). Независимо от условий образования цементиты являются фазой, т. е. химическим соединением (**Fe₃C**), а в структуре условно обозначаются разными индексами.

Перлит и ледебурит – являются двухфазными структурами.

Перлит (**П**) состоит из двух фаз феррита и цементита образуется при распаде аустенита состава т. S (0,8 % углерода) при температуре 727 °С в результате эвтектоидного превращения и представляет собой эвтектоидную механическую смесь.

Ледебурит (**Л**)–эвтектическая смесь двух фаз, образовавшаяся при 1147 °С в результате кристаллизации жидкой фазы состава 4,3 % углерода (т. С на рис. А. 1). В интервале температур 1147 °С до 727 °С ледебурит состоит из двух фаз аустенита и цементита. Структура ледебурит –аустенит

и первичный цементит. При температуре 727°C равновесного существования аустенита концентрация углерода в аустените достигает 0,83 % в результате эвтектоидного превращения образуется эвтектоидная механическая смесь фаз феррита и цементита – перлит. Структура ледебурита ниже температуры 727°C представляет механическую смесь перлита и цементита первичного. Содержание углерода в ледебурите всегда постоянно и равно 4,3 %.

Линия ACD называется линией ликвидуса, выше нее все сплавы находятся в жидком состоянии.

Линии AC и CD, соответственно, – температуры начала кристаллизации аустенита и первичного цементита.

Линия AECF – линия солидуса. Ниже этой линии все сплавы находятся в твердом состоянии.

При достижении температуры 1147°C химический состав жидкой фазы любого сплава, пересекающего линию эвтектики ECF соответствует 4,3% углерода по правилу фаз и отрезков. В структуре таких сплавов присутствует ледебурит (эвтектика).

В интервале температур между линиями GS и PG присутствуют фазы аустенита и феррита в результате полиморфного превращения.

Линия предельной растворимости SE углерода в аустените. Вследствие уменьшения растворимости углерода в гамма железе при понижении температуры из аустенита выделяется цементит вторичный. Линия PSK (727°C) является линией эвтектоидного (перлитного) превращения, заключающегося в том, что структура аустенита состава т. S (0,8 %) превращается в перлит.

Основные фазы и структуры в сплавах железа (по Ю. М. Лахтину)

Фаза или структура	Определение	Раствори- мость углерода	Кристалли- ческая решетка	Твердость, НВ	Примечание
1	2	3	4	5	6
Феррит	Твердый раствор углерода и других элементов в α -железе Различают: а) высокотемпературный феррит, обозначаемый δ -феррит; б) низкотемпературный α -феррит	0,1 % (при 1493 °С) 0,025 % (при 723 °С) 0,006 % (при 20 °С)	ОЦК	80	Атомы растворенных элементов занимают междоузлия (С, N, H), узлы (Mn, Cr, Ni, W, Mo, V и др.) дефектные области
Аустенит	Твердый раствор углерода и других элементов в γ -железе	До 2,06 % (при 1147 °С) 0,8 % (при 423 °С)	ГЦК	170–200	
Цементит	Карбид железа Fe_3C в присутствии примесей образуется легированный цементит, например $(\text{FeMn})_3\text{C}$, $(\text{FeCr})_3\text{C}$, $(\text{FeMnCr})_3\text{C}$	6,67 %	Орторомбическая (подобная алмазу)	850–1000	Легирующие элементы в стали могут образовывать сложные карбиды типа M_7C_3 , M_{23}C_6 , M_6C , M_2C , MC , где М – сумма легирующих элементов, образующих карбид

Продолжение приложения Б

1	2	3	4	5	6
Ледебурит	Эвтектическая структура, состоящая из аустенита и цементита, а после охлаждения ниже $t=727^{\circ}\text{C}$ (A_1) – перлита и цементита	Образуется при содержании в жидком сплаве 4,3 % С			При наличии в стали значительных количеств Cr, W, Mo может образоваться при более низких концентрациях углерода
Перлит	Эвтектоидная структура, состоящая из феррита и цементита, имеющая пластинчатую форму. Во многих случаях получают зернистый перлит, когда зерна цементита расположены в ферритной матрице. Различают: • Грубодифференцированный перлит (1,0 мкм); • Среднедифференцированный сорбитообразный перлит (0,3 мкм); • Тонкодифференцированный троостит (0,15 мкм)	Образуется из аустенита в процессе охлаждения. Для образования перлита в аустените должно быть 0,8 % С		180–250 250–350 350–450	В сорбите или троостите содержание С может быть меньше или больше 0,8 % (квазиэвтектоид). Чем больше степень переохлаждения (скорость охлаждения), тем дисперснее смесь феррита и цементита Сорбит и троостенит могут образовываться как при распаде переохлажденного аустенита, так и в результате распада мартенсита при отпуске. В последнем случае цементит имеет не пластинчатую, а зернистую форму, феррит – повышенную плотность дефектов строения

Окончание таблицы Б.1

1	2	3	4	5	6
Мартенсит	Пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе	Такая же, как в исходном аустените	Тетрагональная	180–700	Мартенсит образуется из аустенита в интервале температур $M_H - M_K$. Для получения мартенсита скорость охлаждения из области аустенита должна быть выше критической
Бейнит	Структура, состоящая из кристаллов пересыщенного углеродом α -твердого раствора (малоуглеродистого мартенсита) и карбидов. Различают: верхний бейнит, в котором частицы карбидов размещаются между пластинками α -фазы; нижний бейнит, где α -фаза имеет игольчатое строение, а дисперсные карбиды располагаются внутри пластин α -фазы			HRC 35–40 HRC 40–50	Образуется в результате распада аустенита в условиях большого переохлаждения (обычно в интервале температур 450–200 °С). Верхний бейнит образуется в верхней зоне промежуточного превращения. Нижний бейнит образуется при температурах, близких к точке M_H

Оптический микроскоп

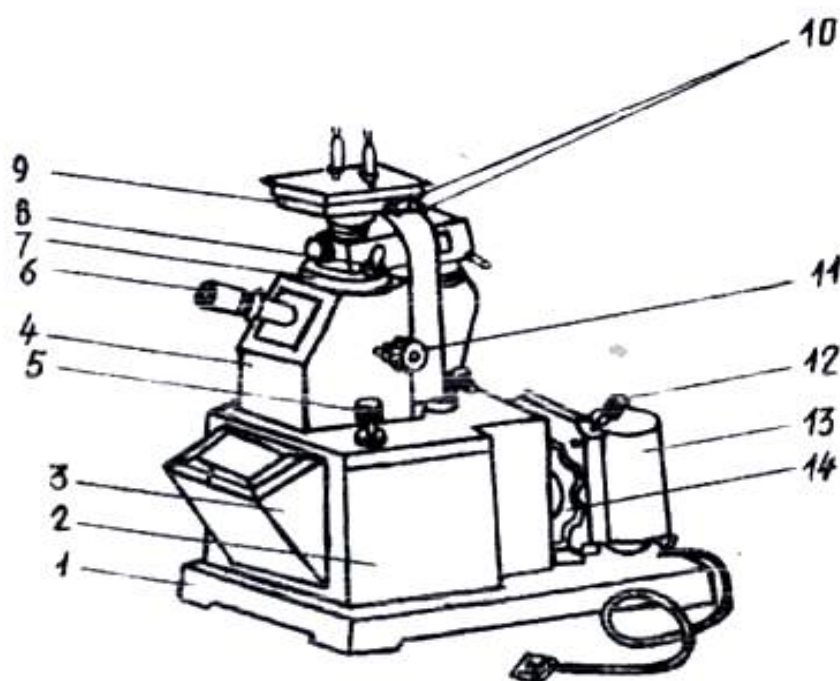


Рис. В1. В Общий вид микроскопа МИМ-7:

1 – основание; 2 – корпус; 3 – фотокамера; 4 – корпус центральной части; 5 – микрометрический винт; 6 – тубус; 7 – анализатор; 8 – рукоятка анализатора; 9 – предметный столик; 10 – микровинты перемещения стола; 11 – рукоятка грубой подачи стола; 12 – винты, центрирующие лампу; 13 – осветитель; 14 – рукоятка светофильтров

Техника работы с оптическим микроскопом

Для исследования микроструктуры непротравленный или протравленный микрошлиф устанавливается на предметный столик микроскопа (9). Регулировка четкости изображения микроструктуры осуществляется микрометрическим винтом (5). Перемещая предметный столик (9) с помощью микровинтов (10), изучают характерные особенности микроструктуры в плоскости микрошлифа.

Приложение Г.

Химический состав углеродистых качественных конструкционных сталей и твердость после прокатки иковки

Сталь	Состав, %			Твердость НВ без термообра- ботки (не более)
	С	Si	Mn	
05 кп	≤ 0,06	≤ 0,03	≤ 0,40	-
08 кп	0,05 – 0,11	0,05 – 0,17	0,25 – 0,50	131
08 пс	0,05 – 0,11		0,35 – 0,65	131
08	0,05 – 0,12	0,17 – 0,37	0,35 – 0,65	
10	0,07 – 0,14	0,17 – 0,37	0,25 – 0,50	143
15	0,12– 0,19	0,17 – 0,37	0,25 – 0,50	149
20	0,32 – 0,40	0,17 – 0,37	0,35 – 0,65	163
25	0,22–0,30		0,50 – 0,80	
30	0,37 – 0,45		0,50 – 0,80	217 229
35	0,42 – 0,50			
40				
45			0,50 – 0,80	241 255
50	0,47 – 0,55			
55	0,55 – 0,60	0,17 – 0,37		
58 (55ПП)	0,55 – 0,63	0,10–0,30	≤ 0,20	255
60	0,57 – 0,65	0,17 – 0,37	0,50 – 0,80	
65	0,62 – 0,70			
70	0,67 – 0,75			269
75	0,72 – 0,80			285
80	0,77 – 0,85			
85	0,82 – 0,90			302
		0,17 – 0,37	0,50 – 0,80	

Примечание.

Стали при выплавке раскисляют, следующими элементами:

полуспокойное (пс) – марганцем и алюминием;

кипящее (кп) – только марганцем.

55ПП – сталь пониженной прокаливаемости.

Контрольные вопросы

1. Дать определение стали.
2. Классификация углеродистых сталей по качеству, назначению и составу.
3. Как влияет содержание углерода на технологические свойства сталей: обрабатываемость резанием, свариваемость, штампуемость?
4. Дать определение видам соединений в сплавах.
5. Покажите на диаграмме Fe-Fe₃C области технического железа и стали.
6. Дайте определение структурам стали и расскажите об их свойствах.
7. Расшифровать следующие марки сталей: Ст3кп, 08, 40 У12, Ст6пс, У11А.
8. Что такое пластическая деформация?
9. Условные обозначения и единицы измерения механических свойств и сплавов.
10. Что происходит с зернами при больших степенях деформации?
11. Как изменяется с увеличением содержания углерода твердость, прочность, пластичность, вязкость стали?
12. Назовите состав стали Р18.
13. Типы карбидов в быстрорежущей стали.
14. Назначение каждого этапа термообработки быстрорежущей стали.
15. Особенности структуры стали Р18 после закалки.
16. Какие существуют операции термообработки для перевода остаточного аустенита в мартенсит?
17. Какая структура стали 40 после полной закалки с охлаждением в воде, в масле?
18. На каком этапе термической обработки в сталях получается мартенсит отпуска, троостит отпуска, сорбит отпуска?
19. Какая структура после окончательной термической обработки у сверла из стали У12, пружины из стали 65?
20. Как исправить структуру стали 40 после перегрева?
21. Какова цель и назначение цементации?
22. Каким видам термической обработки подвергаются детали после цементации?
23. Какова структура цементованного слоя?
24. От чего зависит количество остаточного аустенита в стали и как его можно уменьшить?
25. В чем сущность превращений, происходящих при отпуске?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии изложены теоретические положения о сталях на микроскопическом уровне, приложения для решения вопросов, связанных с управлением их структурообразования. Приведена классификация сталей в зависимости от степени легирования. Рассмотрены процессы, происходящие в структуре сталей при технологических воздействиях, понимание и знание, которых необходимо при производстве качественных полуфабрикатов и готовых изделий. Использование пособия на современном этапе подготовки инженеров всех специальностей позволит расширить их кругозор в областях материаловедения и металлургии, а в дальнейшем использовать на практике.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аустенит 7,9, 12, 13, 14, 15, 18, 21, 22, 23, 29, 32, 33, 39, 41, 42, 43, 51
Быстрорежущие стали 24
Видманштетт 13, 14
Железо 8, 9, 10, 13, 14, 20, 27, 29, 30, 35, 40, 42, 44
Закалка 6, 13, 15, 17, 18, 19, 22, 27, 28, 30, 34, 51
Зерно 52
Карбиды 9, 18, 23, 25, 26, 27, 29, 30, 32, 34, 44, 46
Мартенсит 14–18, 21, 22, 27, 29, 30, 34, 45, 46
Наклеп 36, 37, 38, 52
Нормализации 21
Отжиг 10, 11, 12, 13, 23, 26, 35, 37, 38, 52
Отпуск 6, 9, 15, 16–18, 28–30, 33, 34, 45
Перегрев 13,14
Перлит 10–13, 19, 23, 25, 26, 35–39, 42, 45
Поверхностное легирование 17
Полиморфизм 52
Рекристаллизация 38, 52
Сталь:
углеродистая 8, 10, 14–18, 20–22, 34, 40, 42, 46, 48
легированная 6, 8, 16, 17, 20, 21, 23, 27, 34
Структура 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12–17
Твердость 10–12, 16, 17, 19, 28, 41, 42, 43, 45
Текстура 37
Углерод 8, 9, 10–19, 21
Фаза 8, 25, 26, 27
Феррит 9–13, 15, 16, 23, 25, 35, 40
Цементит 9–12, 38–45
Цементация 18
Эвтектика 23, 31, 43, 53
Эвтектоид 11, 13, 16, 18, 22, 23, 40, 42, 43, 45, 53

ГЛОССАРИЙ

Аустенит – твердый раствор углерода в гамма железе.

Бейнит – структура, состоящая из кристаллов пересыщенного твердого раствора углерода в альфа железе (мартенсита) и троостита.

Вторичная кристаллизация – образование новых кристаллов в твердом кристаллическом теле (по границам зерен).

Вязкость – способность материала противостоять развитию трещины.

Горячая деформация – операция технологического процесса, которую проводят при температуре выше температуры рекристаллизации для получения полностью рекристаллизованной структуры.

Деформация – изменение размеров и формы материала под действием приложенных сил.

Диаграмма состояния – графическое изображение состояния любого сплава изучаемой системы в зависимости от концентрации его компонентов и температуры.

Диффузия – перемещение атомов в кристаллическом теле на расстояния, превышающие средние межатомные данного вещества.

Закалка – операция термической обработки, в результате которой в сплавах образуется неравновесная структура.

Зерно – кристалл, приобретающий неправильную форму в процессе кристаллизации.

Износостойкость – сопротивление материала деталей машин и других трущихся поверхностей износу.

Интерметаллиды – химические соединения между металлами.

Карбиды – химические соединения металлов с углеродом.

Компоненты – вещества, образующие систему.

Кристаллическая решетка – воображаемая пространственная сетка, в узлах которой располагаются атомы (ионы), образующие твердое кристаллическое тело.

Микроскопический анализ – исследование структуры металла или сплава с помощью оптического или электронного микроскопа.

Наклеп – совокупность явлений, связанных с изменением механических, физических и других свойств металлов в процессе пластической деформации.

Отжиг – операция термообработки, в результате которой сплавы приобретают равновесную структуру.

Отпуск – операция термической обработки, в результате которой в закаленных сплавах происходят фазовые превращения, приводящие к стабилизации структурного состояния.

Первичная кристаллизация – переход металла из жидкого состояния в твердое с образованием кристаллической структуры.

Полиморфизм или аллотропия – способность материала изменять тип элементарной ячейки под воздействием температуры и давления.

Рекристаллизация – процесс зарождения при нагреве холодно – деформированной стали.

Сплав – сложная система, состоящая из двух и более компонентов.

Сталь – многокомпонентный сплав, содержащий углерод и ряд примесей, влияющих на ее свойства.

Твердость – свойство материала сопротивляться проникновению в него другого более твердого тела.

Термообработка – совокупность операций нагрева, изотермической выдержки и охлаждения металлических изделий с целью изменения структуры сплава и обеспечения необходимых свойств.

Точка ликвидус – точка начала кристаллизации сплава.

Точка солидус – точка конца кристаллизации сплава.

Углерод – неметаллический элемент, в обычных условиях находится в виде стабильной модификации графита, но может существовать и в виде метастабильной модификации алмаза.

Улучшение – термическая обработка стали, состоящая из закалки и высокого отпуска.

Фаза – однородная часть системы, отделенная от других частей системы линиями или поверхностью раздела, при переходе через которые структура и свойства резко меняются.

Феррит – твердый раствор углерода в альфа железе.

Химико-термическая обработка – сочетание теплового воздействия с химическим, вызывающее изменение структуры и состава в поверхностных слоях изделия.

Холодная деформация – операция технологического процесса, которую проводят при температуре ниже температуры рекристаллизации. Холодная деформация сопровождается упрочнением (наклепом) металла.

Хрупкость – свойство материала разрушаться без заметного поглощения энергии.

Эвтектика – смесь двух и более фаз, которые образуются одновременно из жидкого раствора при постоянной температуре.

Эвтектоид – смесь двух и более фаз, которые образуются одновременно из твердого раствора при постоянной температуре.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арзамасов В. Б. Материаловедение : учебник для высших учебных заведений / В. Б. Арзамасов, А. А. Черепяхин. – М. : Экзамен, 2009. – 350 с.
2. Блантер М. Е. Теория термической обработки / М. Е. Блантер. – М. : Металлургия, 1984. – 328 с
3. Геллер Ю. А. Материаловедение / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт. – М. : Металлургия, 1975. – 447 с.
4. ГОСТ 8233-56. «Сталь. Эталоны микроструктуры». – М. : Стандартгиз, 1956.
5. Гуляев А. П. Металловедение : учебник для вузов / А. П. Гуляева. – 6-е изд. перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1986. – 544 с.
6. Лахтин Ю. М. Материаловедение : учебник для высших технических заведений / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с.
7. Лившиц Б. Г. Металлография / Б. Г. Лившиц – М. : Металлургия, 1971. – 405 с.
8. Материаловедение : учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин и др; под ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 648 с.
9. Материаловедение и технология металлов : учеб. для студентов машиностроит. спец. вузов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин и др.; под ред. Г. П. Фетисова. – 6 изд., доп. – М. : Высш. шк., 2008. – 877 с.
10. Металлография железа (пер. с англ.): в 3-х т. – М. : Металлургия, 1972. – 655 с.
11. Тушинский Л. И. Структурная теория конструктивной прочности материалов / Л. И. Тушинский. – Новосибирск : НГТУ, 2004. – 400 с.

Дополнительные источники литературы

1. Геллер Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер – М. : Металлургия, 1983. – 526 с.
2. Технология термической обработки стали / под ред. М. Л. Бернштейна. – М. : Металлургия, 1981. – 608 с.
3. Справочник по машиностроительным материалам: в 4 т. Т.1. Сталь / под ред. Ю. А. Геллера. – М. : Машгиз, 1959. – 907 с.

Учебное издание

ВИНОГРАДОВА Лидия Александровна,
КУРГАНОВА Юлия Анатольевна

СТРУКТУРА СТАЛЕЙ

Учебное пособие

Редактор М. В.Теленкова
Верстка Р. М. Мухутдинов

ЛР №020640 от 22.10..97.

Подписано в печать 24.12.2009. Формат 60×84/16.

Усл. п. л. 3,26. Тираж 75 экз. Заказ 328.

Ульяновский государственный технический университет

432027, Ульяновск, Сев. Венец, 32

Типография УлГТУ. Ульяновск, Сев. Венец, 32