

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра технологии металлов

А. А. Андрушевич, Т. К. Романова

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Пособие

Минск
БГАТУ
2010

УДК 669.01:620.178(07)
ББК 34.2я7
А66

*Рекомендовано методическим советом факультета
«Технический сервис в АПК» БГАТУ.
Протокол № 7 от 28 октября 2009 г.*

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение
в машиностроении» БНТУ *М. В. Ситкевич*;
заведующий кафедрой «Ремонт тракторов, автомобилей
и сельскохозяйственных машин» БГАТУ,
кандидат технических наук, доцент *Г. И. Анискович*

Андрушевич, А. А.

А66

Материаловедение: пособие /А. А. Андрушевич, Т. К.
Романова. – Минск: БГАТУ, 2010. – 120 с.
ISBN 978-985-519-269-6.

В пособии в краткой форме рассмотрены основные темы и вопросы
по разделу «Материаловедение» дисциплины «Материаловедение.
Технология конструкционных материалов».

Предназначается для студентов и учащихся агротехнических специ-
альностей, может быть использовано магистрантами, аспирантами и
специалистами предприятий агропромышленного комплекса, работаю-
щими в области ремонта и эксплуатации сельскохозяйственной техники.

УДК 669.01:620.178(07)
ББК 34.2я7

ISBN 978-985-519-269-6

© БГАТУ, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛОССАРИЙ.....	9
ГЛАВА 1. АТОМНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	13
1.1. Применение различных материалов в машиностроении и ремонтном производстве.....	13
1.2. Классификация металлов.....	13
1.3. Атомно-кристаллическое строение металлов.....	14
1.4. Типы кристаллических решеток.....	15
1.5. Типы связей в твердых телах.....	17
1.6. Строение реальных кристаллов.....	18
1.7. Дефекты кристаллического строения металлов и сплавов.....	18
1.8. Анизотропия и аллотропия кристаллов.....	19
1.9. Процесс кристаллизации.....	20
1.10. Термодинамические основы фазовых превращений.....	20
1.11. Кривые охлаждения и нагрева металлов и сплавов.....	22
1.12. Влияние степени переохлаждения, примесей на процесс кристаллизации.....	23
1.13. Образование зерен и дендритов.....	23
ГЛАВА 2. ТЕОРИЯ СПЛАВОВ.....	25
2.1. Система. Металлический сплав. Компонент. Фаза.....	25
2.2. Твердые растворы.....	25
2.3. Химические соединения.....	27
2.4. Механические смеси.....	27
2.5. Фазовые превращения в твердом состоянии.....	28
2.6. Построение диаграмм состояния сплавов экспериментальным путем.....	28
2.7. Кривые охлаждения бинарных сплавов.....	29
2.8. Диаграммы состояния бинарных сплавов.....	30
2.9. Правило фаз.....	31
2.10. Правило отрезков.....	31
2.11. Диаграммы состояния двойных сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в жидком и образованием механической смеси в твердом состоянии.....	33
2.12. Диаграммы состояния двойных сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в жидком и твердом состоянии.....	34
2.13. Диаграммы состояния двойных сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в жидком и ограниченной растворимостью в твердом состоянии.....	35
2.14. Диаграммы состояния двойных сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии с образованием перитектики.....	36
2.15. Диаграммы состояния двойных сплавов с образованием устойчивого химического соединения.....	36
2.16. Закон Н. С. Курнакова для двухкомпонентных сплавов.....	37
ГЛАВА 3. ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ.....	39
3.1. Железо и его свойства.....	39
3.2. Кривая охлаждения чистого железа.....	39
3.3. Аллотропические формы железа и их свойства.....	40
3.4. Углерод и его свойства.....	41
3.5. Цементит и его свойства.....	41
3.6. Диаграмма состояния сплавов «железо – цементит».....	41
3.7. Фазовый состав железоуглеродистых сплавов.....	43
3.8. Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов и их свойства.....	44
3.9. Кривые охлаждения железоуглеродистых сплавов.....	45
3.10. Значение диаграммы состояния сплавов «железо – цементит».....	46
3.11. Диаграмма состояния сплавов «железо – графит».....	46
ГЛАВА 4. УГЛЕРОДИСТЫЕ ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ. ЧУГУНЫ.....	48
4.1. Влияние углерода на структуру стали.....	48
4.2. Влияние углерода на свойства сталей.....	48
4.3. Влияние постоянных примесей на структуру и свойства сталей.....	49
4.4. Классификация и маркировка углеродистых сталей.....	50
4.5. Применение углеродистых сталей в сельскохозяйственном машиностроении, строительстве и ремонтном производстве.....	53
4.6. Классификация и маркировка легированных сталей.....	54
4.7. Применение легированных сталей.....	56
4.8. Влияние химического состава и скорости охлаждения на структуру и свойства чугуна.....	59

4.9. Графитизация чугуна.....	60	6.17. Лазерная закалка.....	88
4.10. Получение и маркировка белых, серых, ковких и высокопрочных чугунов.....	61	6.18. Основы химико-термической обработки.....	89
4.11. Структура и свойства белых, серых, ковких и высокопрочных чугунов.....	62	6.19. Цементация стали.....	89
4.12. Применение белых, серых, ковких и высокопрочных чугунов.....	64	6.20. Азотирование стали.....	90
ГЛАВА 5. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.....	65	6.21. Цианирования и нитроцементация стали.....	91
5.1. Сущность термической обработки.....	65	6.22. Диффузионная металлизация.....	91
5.2. Образование аустенита при нагреве стали.....	65	6.23. Марки сталей для различных видов химико-термической обработки.....	92
5.3. Действительная и наследственная величина зерна.....	66	ГЛАВА 7. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	94
5.4. Кинетика превращений переохлажденного аустенита.....	66	7.1. Инструментальные стали.....	94
5.5. Перлитное превращение.....	68	7.2. Классификация инструментальных сталей.....	95
5.6. Промежуточное превращение.....	69	7.3. Термическая обработка инструментальных сталей.....	97
5.7. Мартенситное превращение.....	70	7.4. Применение инструментальных сталей.....	97
5.8. Диаграмма изотермического превращения аустенита, ее значение.....	71	7.5. Быстрорежущие инструментальные стали, их маркировка и термическая обработка.....	99
5.9. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении.....	72	7.6. Твердые сплавы, их маркировка, получение, состав и применение.....	100
5.10. Превращения при отпуске.....	73	7.7. Сверхтвердые материалы, получение, состав и применение.....	102
ГЛАВА 6. ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ.....	75	ГЛАВА 8. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ.....	103
6.1. Классификация видов термообработки.....	75	8.1. Медь и ее сплавы, маркировка и применение.....	103
6.2. Нагрев при термической обработке.....	75	8.2. Латунь, маркировка, применение.....	103
6.3. Защитные атмосферы.....	76	8.3. Бронзы, маркировка, применение.....	104
6.4. Отжиг, его виды и применение.....	76	8.4. Алюминий и его сплавы, маркировка и применение.....	105
6.5. Нормализация.....	78	8.5. Деформируемые алюминиевые сплавы.....	106
6.6. Закалка стали, ее виды и применение.....	79	8.6. Литейные алюминиевые сплавы.....	107
6.7. Выбор охлаждающих сред при термообработке.....	80	8.7. Антифрикционные сплавы на основе меди, алюминия, свинца и олова.....	108
6.8. Прокаливаемость стали.....	81	ВОПРОСЫ	
6.9. Дефекты, возникающие при закалке.....	82	ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ.....	110
6.10. Отпуск стали, его виды и применение.....	83	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	116
6.11. Термомеханическая обработка стали.....	84	ЛИТЕРАТУРА.....	117
6.12. Влияние термической обработки на структуру и свойства стали.....	85		
6.13. Методы поверхностного упрочнения стали.....	86		
6.14. Методы поверхностной закалки стали.....	86		
6.15. Поверхностная закалка с индукционным нагревом.....	87		
6.16. Поверхностная закалка с газопламенным нагревом.....	88		

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» относится к числу основополагающих дисциплин для специальностей инженерного профиля и входит в учебные планы группы специальностей 74.06 Агроинженерия. Она состоит из трех разделов: «Материаловедение», «Горячая обработка металлов», «Обработка материалов резанием» и посвящена металлам и сплавам, которые являются основными материалами для изготовления автотракторной и сельскохозяйственной техники.

Предметом дисциплины является изучение строения и свойств материалов, физико-химических основ получения различными способами изделий из них, методов их упрочнения.

Изучение дисциплины позволяет студентам получить необходимую инженерную технологическую подготовку для профессиональной работы на производстве. Успешное решение многих практических задач невозможно без знания свойств конструктивных материалов, способов их получения и обработки, рациональных областей применения.

Материаловедение – наука, изучающая строение и свойства материалов, устанавливающая связь между их составом, структурой и свойствами, имеет четко выраженный прикладной характер и находится в постоянном развитии.

История материальной культуры человечества неразрывно связана с использованием различных материалов. Переход от каменных орудий труда к металлическим инструментам оценивается как величайшее достижение, вызвавшее бурный рост производительных сил. Металлы применялись с незапамятных времен. Человечество давно умело их обрабатывать и практически использовать. Однако познание металлов не было научным до тех пор, пока не возникло *учение о структуре металлов*, которое успешно развивали русские ученые П. П. Аносов и Д. К. Чернов. *Металловедение* – наука, изучающая строение и свойства металлов и сплавов, устанавливающая связь между их составом, структурой и свойствами. Оно дало научное толкование процессам, происходящим в металлах и сплавах при их получении и термической обработке. Нынешнее состояние металловедения характеризуется применением самых современных методов исследований, в т. ч. оптической и элек-

тронной микроскопии, рентгеноструктурного и физико-химического анализов. Современное производство требует от специалистов, работающих в сельхозмашиностроении и различных отраслях агропромышленного комплекса, определенных знаний в области металловедения, умения рационально использовать с учетом экономики различные металлы и их сплавы, методы их обработки для достижения необходимых технологических и эксплуатационных свойств деталей машин и оборудования. Создание конкурентно способных деталей и изделий, организация их производства, эксплуатация и ремонт невозможны без достаточных знаний в области материаловедения. Последние являются важнейшим показателем образованности инженера-механика сельскохозяйственного производства.

Данное пособие по разделу «Материаловедение» дисциплины «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» является дополнением к разработанному ранее учебно-методическому комплексу и лабораторному практикуму. В нем кратко представлены (для подготовки к лабораторным и практическим занятиям, экзаменам и зачетам) теоретическая часть курса, глоссарий и вопросы для самостоятельного контроля знаний студентами, а также рекомендуемая научно-техническая литература.

ГЛОССАРИЙ

Азотирование — диффузионное насыщение поверхности конструкционных легированных сталей азотом.

Аллотропия (полиморфизм) — способность металла изменять тип кристаллической решетки при различных температурах.

Анизотропия — различие свойств кристалла по разным кристаллографическим плоскостям.

Аустенит — твердый раствор внедрения углерода (C) в γ -Fe-Fe_γ(C).

Баббит — подшипниковый сплав скольжения на основе олова или свинца с твердыми включениями химических соединений.

Борирование — диффузионное насыщение поверхности сталей бором.

Бронза — сплав на основе меди с любым компонентом, кроме цинка. Цинк может присутствовать в бронзах, когда имеются другие компоненты.

Вакансия — точечный дефект, связанный с отсутствием атома в узле кристаллической решетки.

Дислокация — линейный дефект кристаллической решетки (искажение кристаллографической плоскости).

Дюралюмин — деформируемый сплав на основе алюминия. Обычно сплав алюминия с медью и марганцем.

Закалка — операция термической обработки при скорости охлаждения больше критической, назначаемая для получения неравновесной структуры мартенсита (структура очень твердая).

Закалка ТВЧ — поверхностная закалка с нагревом токами высокой частоты (индукционный нагрев).

Компонент — элемент, входящий в состав сплава.

Кривая охлаждения — зависимость изменения температуры при охлаждении сплава данного состава от времени.

Кристаллизация — процесс перехода металла из жидкого в твердое состояние.

Кристаллическая решетка — минимальное пространственное изображение расположения атомов металлов в трех измерениях.

Критическая скорость закалки — наименьшая скорость охлаждения, при которой образуется мартенсит.

Критическая точка — температура сплава, при котором изменяется его фазовое состояние.

Латунь — сплав меди с цинком.

Ледебурит — равномерная механическая смесь аустенита и цементита.

Мартенсит — перенасыщенный твердый раствор углерода в α -Fe.

Металлизация — насыщение сталей металлами.

Нитроцементация — одновременное насыщение сталей углеродом и азотом в газовых средах. В основном идет насыщение углеродом.

Нормализация — операция термической обработки, при которой стали, нагретые до определенных температур, охлаждаются на воздухе (структура равновесная, более мелкозернистая по сравнению со структурой, получаемой после отжига).

Отжиг — операция термической обработки с медленным охлаждением, назначаемая для получения равновесной структуры (структура мягкая, пластичная).

Отпуск — операция термической обработки, назначаемая после закалки стали, для формирования необходимой структуры (свойств) и снятия внутренних напряжений.

Перекристаллизация — изменение фазового состояния твердого сплава.

Перлит — равномерная механическая смесь феррита и цементита.

Раскисление — удаление из стали при затвердевании оксидов железа и кислорода.

Силумин — литейный сплав на основе алюминия. Обычно сплав алюминия с кремнием.

Сорбит — средне дисперсная ферритно-цементитная структура с твердостью 30...35 HRC, обладающая высокой вязкостью, достаточной прочностью и твердостью.

Сталь — сплав железа с углеродом, содержащий от 0,02 до 2,14 % углерода, а также ряд других элементов. **Высококачественная сталь** — сталь с низким содержанием вредных примесей (обычно фосфора не более 0,025 % и серы не более 0,025 %), обладающая повышенными механическими свойствами. **Высоколегированная сталь** — легированная сталь, в которой сумма легирующих элементов составляет более 10 %. **Высокоуглеродистая сталь** — сталь, содержащая более 0,7 % углерода. **Инструментальная сталь** — сталь, применяемая для обработки материалов резанием или давлением, а также для изготовления измерительного инструмента; обладает высокой твердостью, прочностью, износостойкостью. **Качественная сталь** — сталь с регламентированным содер-

жанием вредных примесей (обычно фосфора и серы не более 0,035 % каждого). **Кипящая сталь** – низкоуглеродистая недостаточно раскисленная сталь, продолжающая «кипеть» после заливки в изложницу в результате выделения пузырьков газов. **Конструкционная сталь** – сталь, предназначенная для изготовления различных деталей машин, механизмов и конструкций в машиностроении, строительстве и обладающая необходимым комплексом механических, физических и химических свойств. **Легированная сталь** — сталь со специально введенным одним или более легирующим элементом. **Низколегированная сталь** – легированная сталь, в которой сумма легирующих элементов не превышает 2,5 %. **Низкоуглеродистая сталь** — углеродистая сталь с содержанием углерода до 0,25 %. **Основная сталь** — сталь, выплавленная на основном поду под основным шлаком. **Особо высококачественная сталь** — сталь с содержанием вредных примесей не более: фосфора 0,025 %, и серы 0,015 %. **Полуспокойная сталь** — сталь, полученная при раскислении жидкого металла менее полно, чем при выплавке спокойной стали, но большем, чем при выплавке кипящей стали. **Спокойная сталь** – сталь, раскисленная до такой степени, что при затвердевании слитка не происходит выделения растворенных в ней газов. **Среднелегированная сталь** – легированная сталь, в которой сумма легирующих элементов составляет от 2,5 до 10,0 %. **Среднеуглеродистая сталь** — углеродистая сталь, содержащая от 0,25 до 0,7 % углерода. **Углеродистая сталь** – сталь, не содержащая специально введенных легирующих элементов.

Сплав — соединение двух и более компонентов, полученное сплавлением (спеканием).

Старение — термическая обработка, связанная с нагревом закаленных деталей до температуры 160 °С и длительной выдержкой при комнатной температуре до нескольких суток.

Троостит — тонко дисперсная ферритно-цементитная структура с твердостью 40...45 HRC, обладающая высокой упругостью, достаточной прочностью и твердостью.

Фаза — однородная часть сплава (системы), имеющая одинаковый состав, свойства, кристаллическую решетку, имеющую поверхность раздела.

Феррит — твердый раствор внедрения углерода (C) в α -Fe- $Fe_{\alpha}(C)$.

Цементация — диффузионное насыщение поверхности низкоуглеродистых сталей углеродом.

Цементит — химическое соединение железа с углеродом Fe_3C (карбид железа).

Цианирование — одновременное диффузионное насыщение поверхности сталей углеродом и азотом в жидких средах. В основном идет насыщение азотом.

Чугун – сплав железа с углеродом, содержащий более 2,14 % углерода, постоянные примеси, а иногда и легирующие элементы.

Эвтектика — равномерная механическая смесь, получаемая при кристаллизации жидкого сплава определенного состава при минимальной температуре плавления для данной системы.

Эвтектоид — равномерная механическая смесь, кристаллизующаяся из твердого раствора сплава определенного состава при постоянной температуре для данной системы.

ГЛАВА 1

АТОМНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

1.1. Применение различных материалов в машиностроении и ремонтном производстве

Материалы в технике классифицируют по назначению, т. е. по функциональному применению на *конструкционные, инструментальные, строительные, электротехнические* и т. д.

Конструкционные материалы обладают комплексом свойств, обуславливающих их использование для изготовления различных деталей и узлов машин и оборудования и подвергаемых механическим и иным нагрузкам. К ним предъявляются требования технологичности, дешевизны и доступности. В качестве конструкционных материалов используют металлы и их сплавы, пластмассы, резинотехнические изделия, стекло, керамику, древесину и т. д. Каждый из перечисленных материалов имеет специфические свойства и в определенных условиях используется с оптимальным эффектом. Наибольшее распространение в сельскохозяйственном машиностроении и ремонтном производстве получили сплавы на железной основе (стали и чугуны), что объясняется наличием у них комплекса высоких механических и эксплуатационных свойств, при сравнительно невысокой стоимости и широкой распространенности.

Применение металлических материалов в технике требует глубокого знания их свойств. Изучив свойства металлов, можно узнать, где, в каком состоянии и какой металл может быть использован наиболее эффективно.

Свойства простых металлов и сплавов, состоящих из нескольких элементов, зависят от *природы* самих элементов, их количественного соотношения – *состава*, а также от *состояния* (закаленного, отожженного, деформированного и т. д.). Свойства металлов определяются внутренним строением – *структурой*.

1.2. Классификация металлов

Каждый металл отличается от другого металла внутренним строением и свойствами. В технике все используемые металлы и их сплавы условно подразделяют на две большие группы – черные и цветные.

Черные металлы имеют темно-серый цвет, большую плотность, высокую температуру плавления, относительно высокие твердость, прочность и сравнительно невысокую стоимость. Они являются основными конструкционными материалами, применяемыми в машиностроении, на их долю приходится порядка 94–95 % из общего числа используемых в мире металлов. Наиболее типичным металлом этой группы является железо. Черные металлы, в свою очередь, принято подразделять на следующие группы:

1) железные металлы – железо, кобальт, никель и близкий к ним марганец;

2) тугоплавкие металлы с температурой плавления выше, чем у железа (больше 1539 °С), – ванадий, молибден, вольфрам, ниобий, цирконий и др.;

3) урановые металлы, с повышенной радиоактивностью и используемые для атомной энергетики – уран, торий, плутоний и др.;

4) редкоземельные металлы – лантан, церий, неодим и сходные по свойствам иттрий и скандий, имеющие малую распространенность в природе.

Цветные металлы чаще всего имеют характерную окраску – красную, желтую, белую, относительно невысокую температуру плавления, обладают большой пластичностью, малой твердостью. Наиболее распространенные из них – алюминий, медь, магний, серебро, цинк. Цветные металлы принято делить на:

1) легкие металлы – бериллий, магний, алюминий с малой плотностью до 3 г/см³;

2) благородные металлы – золото, серебро и металлы платиновой группы (платина, иридий, родий, осмий и др.), а также «полублагородная» медь с высокой устойчивостью против коррозии;

3) легкоплавкие металлы – ртуть, висмут, олово, свинец, кадмий, цинк, сурьма и др. с температурами плавления не выше 500 °С.

1.3. Атомно-кристаллическое строение металлов

С учетом размеров атомов и равновесных расстояний между ними, каждый металл имеет свою *атомно-кристаллическую структуру*, которой называют взаимное расположение атомов в кристалле. Кристалл состоит из атомов (ионов), расположенных в определенном порядке, который периодически повторяется в трех измерениях. При этом каждый атом имеет одно и то же количество ближайших атомов-соседей, расположенных на одинаковом расстоя-

нии. Для описания вариантов взаимного расположения атомов в кристалле используются различные способы. Воображаемые линии, проведенные через центры атомов, образуют решетку, так называемую **кристаллографическую плоскость** (рисунок 1.1), в узлах которой расположены атомы. Многократное построение кристаллографических плоскостей, расположенных параллельно, воспроизводит пространственную кристаллическую решетку, узлы которой являются местом расположения атомов.

Наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла во всем объеме, получил название **элементарной кристаллической ячейки**.

Наиболее простой и распространенной среди металлов является кубическая система, при которой элементарная ячейка представляет собой куб.

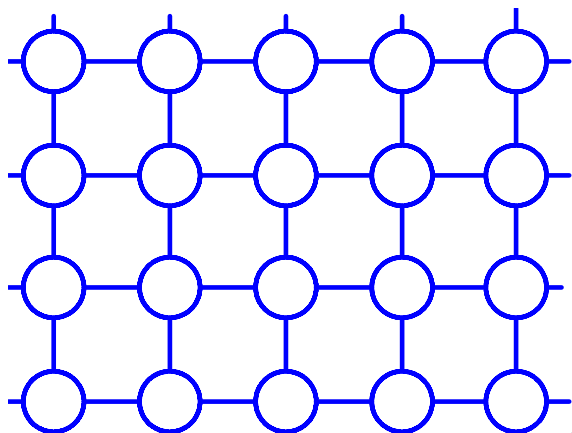


Рисунок 1.1. Расположение атомов в кристаллографической плоскости

1.4. Типы кристаллических решеток

Большинство металлов образуют одну из следующих высоко-симметричных кристаллических решеток с плотной упаковкой атомов: кубическую объемно-центрированную ОЦК (рисунок 1.2, а), кубическую гранецентрированную ГЦК (рисунок 1.2, б), гексагональную плотноупакованную (рисунок 1.2, в).

1. Размеры кристаллической решетки характеризуются параметрами или **периодами** решетки, под которыми понимают расстояние

между центрами соседних атомов, находящимися в узлах кристаллической решетки и образующими элементарную ячейку. Кубическую решетку определяет один параметр – длина ребра куба a (рисунок 1.2, а). Параметры имеют величины порядка атомных размеров и измеряются в нанометрах (ангстремах). Период решетки металлов находится в пределах от 10 до 60 нм.

2. Характеристикой строения и свойств кристаллических решеток является **координационное число** K , под которым понимают число атомов, находящихся на равном и наименьшем расстоянии от данного атома. Обозначение кристаллической решетки с указанием ее типа и координационного числа производится по следующей системе:

- 1) простая кубическая (К) – К6;
- 2) кубическая объемно-центрированная (ОЦК) – К8;
- 3) кубическая гранецентрированная (ГЦК) – К12;
- 4) гексагональная плотноупакованная (ГПУ) – ($c/a = 1,633$) – К12;
- 5) гексагональная (Г) – К6.

3. **Коэффициент компактности** K_k равен отношению объема, занимаемого атомами, к объему кристаллической решетки:

$$K_k = V_{ат} / V_{реш} < 1.$$

Наиболее плотными, т. е. содержащими наибольшее количество атомов на один и тот же объем, являются металлы с гранецентрированной кубической решеткой – 0,74, затем следуют металлы с гексагональной решеткой – 0,72, объемно-центрированной – 0,68.

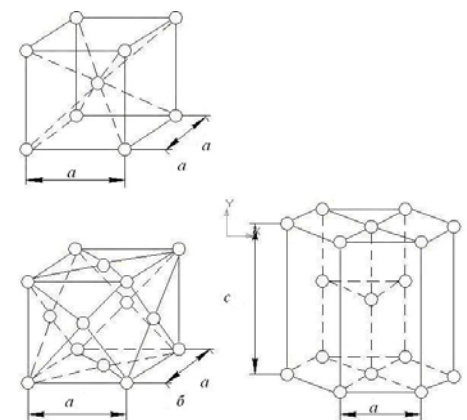


Рисунок 1.2. Кристаллические решетки металлов

1.5. Типы связей в твердых телах

Типичным атомным строением металлов является наличие малого количества валентных электронов на внешней электронной оболочке. Валентные электроны слабо связаны с ядром, поэтому они под воздействием внешних сил при затратах сравнительно небольшой энергии могут покинуть свои орбиты.

При сближении изолированных атомов внешние электронные оболочки начинают перекрываться и взаимодействовать между собой. В результате изменяется строение атома. В зависимости от характера изменения строения валентных электронных оболочек различают четыре основных типа связи между атомами: ионную (гетерополярную), ковалентную (гомеополярную), полярную (связь Ван-дер-Ваальса) и металлическую, которая является основной для металлов.

Металлический тип связи осуществляется между атомами, когда число валентных электронов в атоме мало. В этом случае свободных электронных оболочек имеется значительно больше, чем электронов для их заполнения. Поэтому при перекрытии внешних электронных оболочек электроны отрываются от своих атомов и свободно перемещаются в разных направлениях по незанятым электронным оболочкам между положительно ионизированными атомами (ионами), образуя вокруг них свободный, так называемый, электронный газ. Между положительными ионами и свободным электронным газом возникают силы электростатического взаимодействия, которые и обуславливают металлический тип связи между атомами.

Все металлы и сплавы – тела **кристаллические**, атомы расположены в пространстве закономерно, устойчиво, в определенной последовательности (в отличие от аморфных тел с хаотическим расположением атомов).

Закономерность расположения атомов в пространстве является непосредственным следствием фундаментального закона природы: устойчивыми оказываются состояния, при которых энергия системы **минимальна**. Взаимодействие – это конкуренция сил притяжения и отталкивания между атомами одновременно. Эти силы электрического происхождения стремятся оттолкнуть друг от друга положительно заряженные ионы и стремятся сблизить атомы вследствие совместного действия обобществленных электронов.

1.6. Строение реальных кристаллов

Любой металл состоит из большого числа кристаллов, так как кристаллы имеют небольшие размеры (0,5–3,0 мм). Такое строение металлов называют **поликристаллическим**. Простой металл – это множество мелких кристаллов (поликристаллов), имеющих неправильную внешнюю форму, называемых зернами, и сочлененных по границам, т. е. **кристаллитов**.

В соответствии с законами физики все металлы в твердом состоянии имеют строго определенную кристаллическую структуру. Однако, в действительности каждая кристаллическая решетка имеет различные дефекты.

Металлы не являются однородными, в них есть химические и физические нарушения – дефекты. Они образуются в процессе кристаллизации металла из жидкого расплава.

1.7. Дефекты кристаллического строения металлов и сплавов.

1. Точечные дефекты. Имеют малые размеры в трех измерениях, сопоставимые с размерами атомов. К ним относятся дислоцированный атом и вакансия (рисунок 1.3).

Атом, оказавшийся в междоузлии, называется **дислоцированным**. Он создает напряженное состояние в кристаллической решетке. Место в кристаллической решетке, оказавшееся без атома, называется **вакансией**.

Вакансии оказывают большое влияние на диффузию в металлах. Концентрация вакансий в металле определяется величиной, которая зависит от температуры.

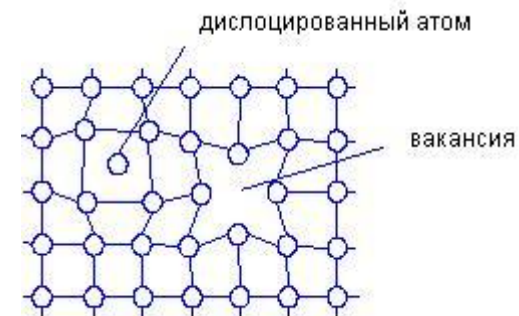


Рисунок 1.3. Дефекты в кристаллической решетке

2. Линейные дефекты. Линейные несовершенства имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяженность в третьем измерении, достигая размеров кристалла. Этими несовершенствами могут быть ряд вакансий или ряд междоузельных атомов. Видами линейных несовершенств являются **краевые** и **винтовые** дислокации.

Краевая линейная дислокация представляет собой локализованное искажение кристаллической решетки, вызванное наличием в ней «лишней» атомной полуплоскости.

Винтовая дислокация – это прямая линия, вокруг которой атомные плоскости изогнуты по винтовой поверхности, обращаясь по часовой стрелке – правые, против часовой стрелки – левые.

Механические свойства металлов, в частности прочность, зависят от количества дислокаций и особенно их способности к перемещению под действием напряжений. Каждому определенному состоянию соответствует определенная **плотность дислокаций**, которая может увеличиваться под действием напряжений, т. е. они способны к увеличению. При этом резко изменяются свойства металлов.

3. Поверхностные дефекты малы только в одном измерении. Они представляют собой поверхности раздела между отдельными зернами или субзернами в поликристаллическом металле. Границы между зернами представляют переходную область шириной до 3–4 межатомных расстояний, у которой решетка одного кристалла переходит в решетку другого кристалла, имеющего иную ориентацию. Поверхностные дефекты влияют на механические и физические свойства металлов. Чем меньше зерна, тем выше предел текучести, ударная вязкость и меньше опасность хрупкого разрушения.

1.8. Анизотропия и аллотропия кристаллов

В кристаллах расстояния между атомами в различных кристаллографических плоскостях различны, поэтому отличны и их физические и химические свойства. **Анизотропией** называют различие свойств кристалла в зависимости от кристаллографического направления. В поликристаллическом металле кристаллы ориентированы по-разному и анизотропия не проявляется. Это явление называется **квазианизотропией**.

Аллотропия (полиморфизм) – способность одного и того же металла изменять тип кристаллической решетки при различных температурах. Различные кристаллические формы одного металла

называются **аллотропическими** или **полиморфными превращениями**. Превращение одной аллотропической формы в другую сопровождается поглощением или выделением тепла и происходит при постоянной температуре. Температура перехода из одной модификации в другую называется **температурой аллотропического (полиморфного) превращения**.

Явление полиморфизма основано на едином законе природы об устойчивости состояния системы с наименьшим запасом энергии.

1.9. Процесс кристаллизации

Процесс перехода металла из жидкого состояния в твердое при определенной температуре с образованием кристаллической структуры называется **кристаллизацией**. Кристаллизация может проходить и в твердом состоянии при переходе металла из одного фазового состояния в другое (**перекристаллизация**). В природе все самопроизвольно протекающие процессы (плавление, кристаллизация и т. п.) происходят вследствие того, что новое состояние является энергетически более устойчивым, обладает меньшим запасом свободной энергии. Процесс кристаллизации развивается, если свободная энергия твердого состояния меньше, чем жидкости.

Кристаллизация осуществляется вследствие перехода вещества к термодинамически более устойчивому состоянию, с меньшей свободной энергией.

1.10. Термодинамические основы фазовых превращений

Энергетическое состояние системы, имеющей большое число охваченных тепловым движением частиц, характеризуется особой термодинамической функцией E , называемой свободной энергией

$$E = H - T \cdot S,$$

где H – внутренняя энергия системы; T – абсолютная температура, К; S – энтропия (функция состояния).

На рисунке 1.4 показано изменение свободной энергии металла в жидком и твердом состояниях в соответствии с изменением температуры. Свободная энергия того и другого состояния снижается с повышением температуры, однако наклон кривых на графике различен. При какой-то конкретной температуре T_s свободная энергия твердого и жидкого состояния совпадают (пересечение кривых на

графике). Это и будет температура плавления. При этой температуре оба состояния вещества имеют одинаковую устойчивость. Повысить температуру системы, означает повысить устойчивость жидкого состояния, понизить температуру – повысить устойчивость твердого состояния. Чем больше $T_s - T_k$, тем выше скорость кристаллизации. При температуре плавления кристаллизация невозможна, так как нет разницы свободных энергий $E_{ж}$ и $E_{т}$.

Для начала кристаллизации необходимо, чтобы процесс был термодинамически выгоден системе и сопровождался уменьшением свободной энергии системы. Охлаждение жидкости ниже равновесной температуры кристаллизации ($T_s - T_k$) называется **переохлаждением**.

При достижении равновесной температуры T_s на кривой охлаждения возникает горизонтальная площадка, так как отвод тепла компенсируется выделением при затвердевании скрытой теплоты кристаллизации.

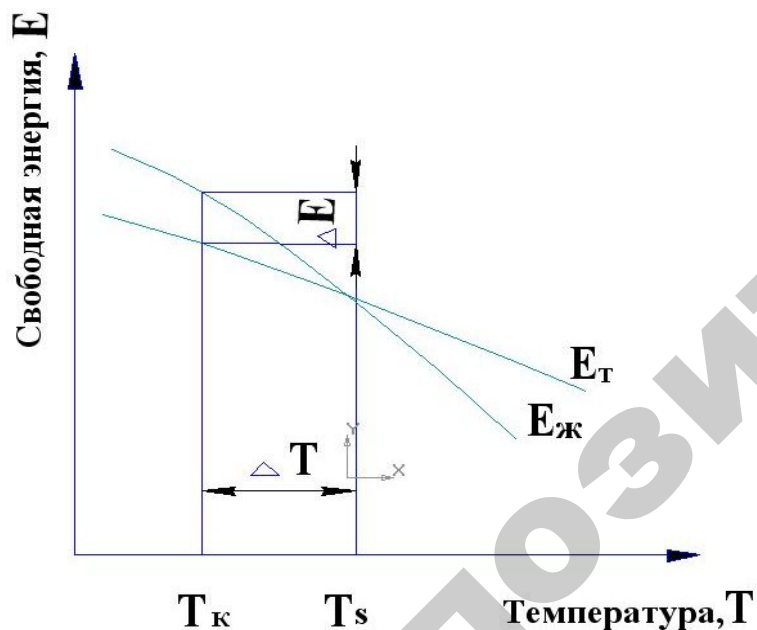


Рисунок 1.4. Кривые изменения свободной энергии жидкого и твердого состояния тела в зависимости от температуры

T_s – равновесная температура превращения жидкости в кристаллический металл или теоретическая (равновесная) температура кристаллизации;

T_k – фактическая температура кристаллизации, при которой практически начинается кристаллизация;

$T_s - T_k$ – степень переохлаждения.

1.11. Кривые охлаждения и нагрева металлов и сплавов

Процесс перехода металла из жидкого состояния в твердое кристаллическое при охлаждении и, наоборот, при нагревании, изображается кривыми в координатах «температура – время» (рисунок 1.5).

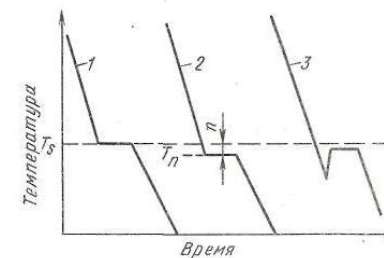


Рисунок 1.5. Кривые охлаждения при кристаллизации

Охлаждение металла в жидком состоянии сопровождается плавным понижением температуры без качественного изменения состояния.

При достижении температуры кристаллизации на кривой охлаждения появляется горизонтальная площадка, так как отвод тепла компенсируется выделяющейся при затвердевании **скрытой теплотой кристаллизации**. По окончании кристаллизации – полного перехода в твердое состояние, температура металла снова начинает снижаться, и твердое кристаллическое вещество охлаждается. Теоретический процесс кристаллизации изображается кривой 1 на рисунке 1.5. Реальный процесс показывают кривые 2, 3. Металл в жидком состоянии охлаждается до фактической температуры кристаллизации T_k , находящейся практически ниже теоретической равновесной температуры кристаллизации T_s . При этом создаются энергетические условия, необходимые для протекания процесса кристаллизации металла.

1.12. Влияние степени переохлаждения, примесей и других факторов на процесс кристаллизации

Кристаллизация развивается только при некотором переохлаждении жидкости ниже равновесной теоретической температуры T_s , до температуры фактической кристаллизации T_k . Чем больше степень переохлаждения $T_s - T_k$, тем выше скорость кристаллизации. С увеличением скорости охлаждения металла степень переохлаждения больше.

Процесс кристаллизации состоит из двух стадий: 1) образование зародышей (центров кристаллизации); 2) рост этих центров (скорость кристаллизации).

В жидком состоянии атомы совершают произвольное перемещение по всему объему металла, сохраняется так называемый **ближний порядок**, т. е. упорядоченное расположение атомов распространяется на очень небольшое расстояние. С понижением температуры степень ближнего порядка возрастает. Первоначально в объеме металла возникают центры кристаллизации, они постоянно растут, доля жидкой фазы при этом уменьшается. Процесс завершается полным затвердеванием металла.

На процесс кристаллизации существенно влияет число центров кристаллизации, возникающих в единицу времени, и скорость их роста. Сильный перегрев ведет к росту зерна из-за уменьшения числа зародышей.

Изложенный процесс образования центров кристаллизации справедлив только для **спонтанной** (самопроизвольной) кристаллизации, когда центрами служат флуктуации (отклонения по температуре, давлению, концентрации) в относительно чистом, свободном от примесей металле.

В реальных металлах центрами кристаллизации наряду с флуктуациями могут быть не растворившиеся частички кристаллизующегося или постороннего вещества, стенки формы. Такая кристаллизация называется **вынужденной**. В этом случае может изменяться число центров и степень переохлаждения (зависит от скорости охлаждения) в процессе кристаллизации.

1.13. Образование зерен и дендритов

В поликристаллическом металле кристаллы с различной ориентацией в процессе затвердевания соприкасаются друг с другом и искажают

внешнюю форму. Такие кристаллы с правильным внутренним строением и искаженной внешней формой называются **зернами**.

При температурах, близких к равновесной T_s , в жидком металле возможно образование небольших группировок, в которых атомы расположены так же, как в кристаллах. Такие образования постепенно превращаются в **зародыши (центры кристаллизации)**. Зародыши растут только в том случае, если при этом уменьшается свободная энергия системы. Условия отвода тепла при кристаллизации значительно влияют на форму зерен. Кристаллы растут преимущественно в направлении, обратном отводу тепла. При направленном отводе тепла образуются вытянутые **столбчатые кристаллы**, а при одинаковой скорости отвода во всех направлениях формируются **равноосные кристаллы**. Сильный перегрев ведет к росту зерна из-за уменьшения числа зародышей. В зависимости от условий кристаллизации и степени чистоты металлов могут возникать кристаллы разной формы: пластинчатые, игольчатые, сфероидные.

Наиболее распространенный дендритный механизм роста кристаллов обнаружен Д. Н. Черновым в стальном слитке при его затвердевании в 1878 г. Максимальная скорость роста кристаллов наблюдается в направлении плоскостей и направлений с максимальной плотностью упаковки атомов. Первоначально образуются длинные ветви, называемые осями первого порядка. Одновременно с ними на их ребрах происходит зарождение и рост перпендикулярных к ним ветвей второго порядка, а на них уже зарождаются и растут оси третьего порядка. Кристаллы формируются в форме дендритов, между ветвями которых находится часть еще не затвердевшего металла.

ГЛАВА 2

ТЕОРИЯ СПЛАВОВ

2.1. Система. Металлический сплав. Компонент. Фаза

В теории сплавов при рассмотрении построения диаграмм состояния важным является понятие системы. Под *системой* понимают совокупность фаз, находящихся в равновесии в данном сплаве в зависимости от температуры, давления и концентрации.

Чистые металлы обладают низкой прочностью по сравнению со сплавами, поэтому в технике, как правило, применяются не чистые металлы, а сплавы. *Сплавом* называется вещество, полученное сплавлением двух или более компонентов. Сплав, приготовленный, в основном, из металлов и обладающий металлическими свойствами, называется *металлическим сплавом*. Строение металлического сплава более сложное, чем у чистого металла, и зависит от того, в какие взаимодействия вступают компоненты, его образующие. Сплав может находиться в равновесном и метастабильном состояниях.

Вещества, образующие сплавы, называются *компонентами*. Компонентами могут быть чистые элементы, химические соединения. Основным компонентом должен быть металлический элемент, а сплав, приготовленный преимущественно из металлов, называется металлическим сплавом.

Фазой называется однородная часть системы (сплава), имеющая одинаковый состав, свойства, тип решетки и отделенная от остальных частей поверхностью раздела. В жидком состоянии однородный сплав является однофазным. Взаимное расположение фаз, их размеры и формы, видимые в микроскопе при увеличении, представляют собой внутреннее строение сплава – его структуру.

2.2. Твердые растворы

Твердым раствором называют соединение, в котором один из компонентов А сохраняет кристаллическую решетку – *растворитель*, а другой компонент В не сохраняет своей решетки и отдает свои атомы в решетку первого компонента. Твердый раствор, состоящий из нескольких компонентов, имеет один тип решетки и представляет одну фазу. Обозначение – А (В).

Различают *твердые растворы замещения* (рисунок 2.1, а) и *твердые растворы внедрения* (рисунок 2.1, б). В твердом рас-

творе замещения атомы растворенного компонента замещают часть атомов растворителя в его кристаллической решетке. Размещение растворенных атомов в решетке неупорядоченно, произвольно.

В твердых растворах внедрения атомы растворенного компонента располагаются в межатомных промежутках кристаллической решетки растворителя.

Размеры атомов растворителя и растворенного вещества различаются, поэтому кристаллическая решетка всегда искажается. Изменение параметров кристаллической решетки – основной момент, определяющий изменение свойств сплавов.

Твердые растворы замещения могут быть *неограниченными и ограниченными*, т. е. их существование возможно либо при любой концентрации, либо в ограниченной области концентраций компонентов.

Существование твердых растворов замещения с неограниченной растворимостью возможно при соблюдении следующих условий:

1) компоненты должны обладать одинаковыми по типу кристаллическими решетками (условие изоморфности), например, сплавы *Cu-Ni*, ОЦК, К12;

2) различие в атомных размерах компонентов и в периодах кристаллической решетки не должно превышать 8%. При различии этих размеров в пределах 8–15% возможно образование ограниченных твердых растворов. При различии в размерах атомов более 15% искажение кристаллической решетки становится столь велико, что образование твердых растворов становится невозможным.

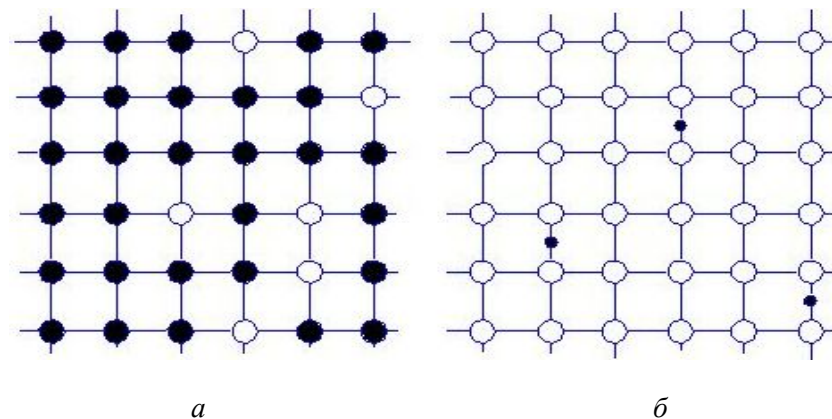


Рисунок 2.1. Расположение атомов в твердых растворах

Образование твердых растворов внедрения возможно в тех случаях, когда диаметр растворенного вещества элемента не превышает размеров пор кристаллической решетки. Твердые растворы внедрения образуются только при ограниченной растворимости компонентов, они сохраняют металлический тип связи. Например, сплавы переходных металлов с элементами, имеющими малые размеры атомов, *C, N, H, O, B*.

2.3. Химические соединения

Химические соединения между металлами образуются довольно часто. Они представляют собой сплавы, в которых компоненты вступили между собой в химическое взаимодействие. Отличие химических соединений от твердых растворов заключается в следующем:

1) химическое соединение имеет кристаллическую решетку, которая отличается от кристаллической решетки элементов, образующих это соединение;

2) в соединениях всегда сохраняется простое кратное весовое соотношение элементов, поэтому их состав можно выразить формулой A_nB_m , где *A* и *B* – соответствующие элементы, а *n* и *m* – простые целые числа, отсутствует металлический тип связи;

3) свойства химического соединения и свойства образующих его элементов резко отличаются. Как правило, это высокая твердость, электрическое сопротивление;

4) химическое соединение имеет постоянную температуру плавления.

2.4. Механические смеси

Механическая смесь компонентов *A* и *B* образуется тогда, когда они не способны к взаимному растворению в твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию с образованием соединения. При образовании механической смеси кристаллические решетки фаз не изменяются. Фазы, образующие такую структуру, отчетливо обнаруживаются микроанализом.

Различают **простую**, **эвтектическую** и **эвтектоидную** механические смеси.

Простая механическая смесь образуется при любом процентном соотношении компонентов (сплавы железа со свинцом).

Эвтектическая механическая смесь имеет определенный химический состав, образуется при постоянной температуре – самой низкой температуре кристаллизации системы из жидкого раствора определенного химического состава (например, эвтектика – свинец + сурьма, ледебурит – аустенит + цементит в железоуглеродистых сплавах).

Эвтектоидная механическая смесь имеет определенный химический состав, образуется при постоянной температуре, но только при распаде твердого раствора определенного химического состава (например, эвтектоид перлит – феррит + цементит в сталях).

2.5. Фазовые превращения в твердом состоянии

Фазовые превращения в сплавах в твердом состоянии называются процессами **вторичной кристаллизации** или **перекристаллизации**. Перекристаллизация протекает в следующих случаях:

1) при переменной растворимости компонентов в твердом состоянии в зависимости от температуры, что характерно для сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии;

2) когда один из компонентов сплава претерпевает полиморфные превращения. К ним относят железо, марганец, кобальт, титан, цирконий и др.

2.6. Построение диаграмм состояния сплавов экспериментальным путем

Процессы кристаллизации металлических сплавов и закономерности формирования их структуры в твердом и жидком состояниях описываются с помощью **диаграмм состояния**. Диаграммы состояния строятся на основе экспериментальных данных термического, металлографического, рентгеновского и других анализов.

Диаграмма состояния – графическое изображение фазовых превращений в зависимости от температуры и концентрации. Она строится для условий равновесия, поэтому превращения можно фиксировать только в условиях медленного изменения температуры (их также называют диаграммами фазового равновесия).

При использовании термического анализа получают кривые охлаждения сплавов различной концентрации компонентов *A* и *B*. По их перегибам и остановкам, связанными с тепловыми эффектами превращений, определяют температуры соответствующих превра-

щений. Температуры, при которых происходят изменения физического состояния сплава, называют **критическими точками**. Полученные критические точки начала и конца кристаллизации для ряда сплавов переносят в координаты «температура – концентрация» (рисунок 2.2) и последовательно соединяют плавными кривыми.

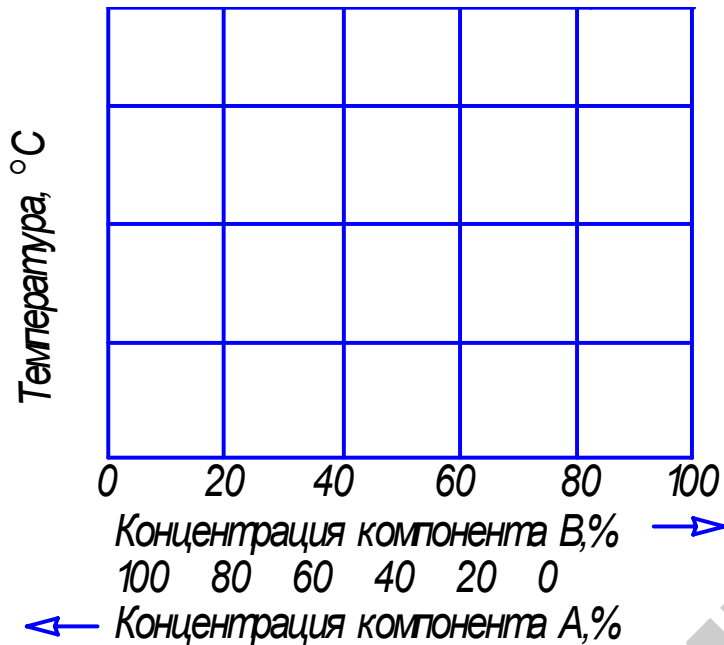


Рисунок 2.2. Координаты для изображения диаграммы состояния двухкомпонентной системы

2.7. Кривые охлаждения бинарных сплавов

Кривые охлаждения – это графические зависимости изменения температуры двухкомпонентного (бинарного) сплава (T) от времени охлаждения (τ) для различных концентраций (рисунок 2.3). Точки перегиба – остановки характеризуют начало и конец фазовых превращений. Их строят экспериментально, преимущественно на основе результатов термического анализа.

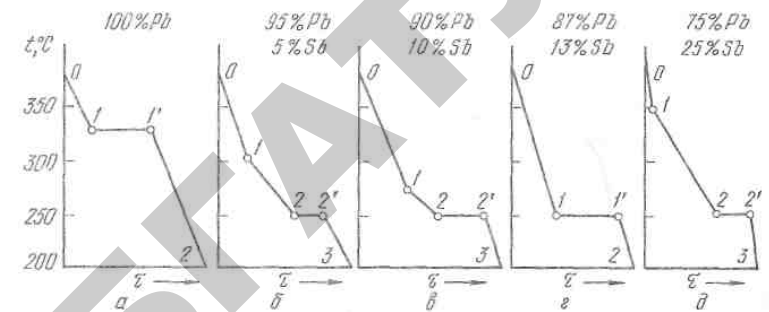


Рисунок 2.3. Кривые охлаждения сплава «свинец – сурьма»

В отличие от чистых металлов металлические бинарные сплавы кристаллизуются в некотором интервале температур, определяемом началом и концом перехода сплава из жидкого в твердое состояние, внутри которого наряду с твердой есть и жидкая фаза. Поэтому на кривой охлаждения сплава фиксируется не одна, а две критические точки – начала и конца кристаллизации (рисунок 2.3).

На кривых охлаждения сплавов в точках 1 начинается процесс кристаллизации (точки *ликвидуса*), точки 2 отвечают концу кристаллизации (точки *солидуса*). Кривая охлаждения эвтектического двухкомпонентного сплава подобна кривой охлаждения чистого металла.

2.8. Диаграммы состояния бинарных сплавов

Для решения ряда практических задач необходимо знать, как изменяются строение и свойства бинарных (двойных) сплавов различного состава при их охлаждении и нагревании.

Диаграмму состояния двухкомпонентной системы строят в координатах «температура – концентрация» (рисунок 2.2) в виде графического изображения фазовых превращений на плоскости. На оси абсцисс откладывают концентрацию компонентов в весовых процентах, сумма которых составляет 100, на оси ординат – температуру. Каждая точка на оси абсцисс соответствует определенному содержанию каждого его компонента.

По диаграмме состояния бинарных сплавов можно определить температуры плавления, кристаллизации и аллотропических пре-

вращений в сплавах, примерно оценить их физико-механические свойства, правильно выбрать технологические режимы литья, термической обработки и обработки давлением.

2.9. Правило фаз

Общие закономерности изменения числа фаз в сплаве определяются **правилом фаз** (законом Гиббса). Правило фаз в математической форме выражается уравнением

$$C = K + n - \Phi,$$

где C – степень свободы;

K – число компонентов, образующих систему;

Φ – число фаз, находящихся в равновесии;

n – число внешних факторов.

Под **числом степеней свободы** (вариантностью) понимается число внешних и внутренних факторов (температура, давление и концентрация), которые можно изменять без изменения числа фаз в системе.

При использовании правила фаз в отношении металлов практически переменным считают только один внешний фактор – **температуру**, т. к. давление оказывает малое влияние, и уравнение принимает вид:

$$C = K + 1 - \Phi.$$

Анализ уравнения показывает, что в системе с двумя компонентами в равновесии может находиться не более трех фаз. Если в системе находится максимальное число фаз, то число степеней свободы равно $C = 0$, такое равновесие называется **инвариантным**. Это возможно в определенных условиях (при постоянной температуре и определенном составе находящихся в равновесии фаз).

2.10. Правило отрезков

В процессе кристаллизации сплава изменяются концентрация фаз и количество каждой фазы. Используя диаграмму состояния двойных сплавов, с помощью правила отрезков можно в любой ее точке определить количество фаз и их состав.

Первое положение правила отрезков

Чтобы определить концентрации фаз или структур, через данную точку, характеризующую состояние сплава, проводят горизонталь-

ную линию (**каноду**) до пересечения с линиями, ограничивающими данные фазы или структуры. Проекции точек пересечения каноды с линиями диаграммы на ось концентрации показывают состав фаз или структур (рисунок 2.4).

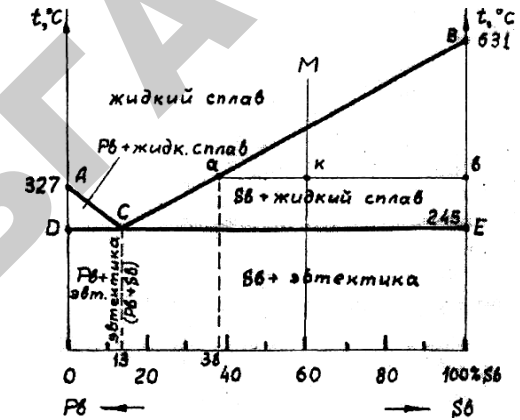


Рисунок 2.4. Применение правила отрезков для сплавов системы «Pb–Sb»

Второе положение правила отрезков

Для определения количественного соотношения фаз или структур через заданную точку проводят каноду до пересечения с линиями, ограничивающими данные фазы или структуры. Отрезки этой линии между заданной точкой и точками, определяющими составы фаз или структур, обратно пропорциональны количествам этих фаз.

Отношение количества жидкой фазы к количеству твердой фазы (Sb) определяется отношением следующих отрезков:

Отрезок данной каноды « ab » характеризует количество обеих фаз в % и равняется 100 %. Отношение обратного отрезка ко всей каноде, умноженное на 100 %, определяет количество интересующей фазы

$$Q_{ж} = \frac{kb}{ab} \cdot 100 \%.$$

Количество твердой фазы (Sb)

$$Q_{тв(Sb)} = \frac{ka}{ab} \cdot 100 \%.$$

2.11. Диаграммы состояния двойных сплавов с неограниченной растворимостью в жидком и отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии (I рода)

Диаграмма состояния для случая, когда компоненты имеют разные кристаллические решетки, с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии и образуют *механическую смесь* двух твердых фаз, показана на рисунке 2.5.

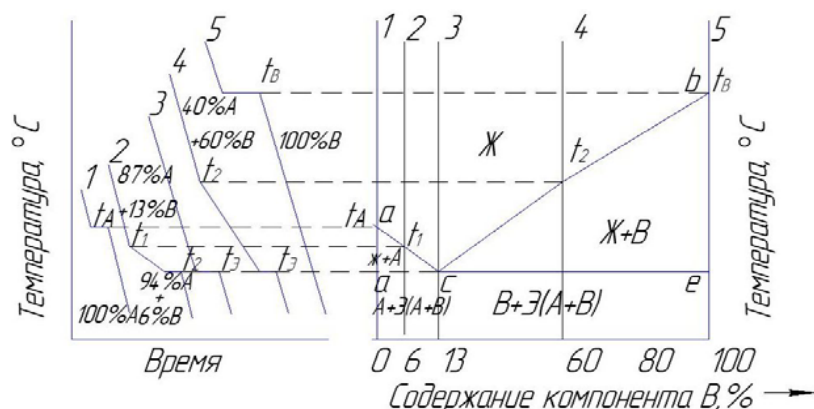


Рисунок 2.5. Кривые охлаждения и диаграмма состояния сплавов, образующих механическую смесь в твердом состоянии: Ж – жидкая фаза; Э – эвтектика

Сплав, содержащий 87 % А и 13 % В (кривая 3), в котором происходит одновременная кристаллизация этих компонентов при постоянной и самой низкой для данной системы сплавов температуре (точке С), называется *эвтектическим*. Все сплавы, имеющие отношение компонентов, отличное от эвтектического соотношения, кристаллизуются в интервале температуры, причем первоначально кристаллизуются компоненты, избыточные по сравнению с эвтектическим сплавом. Система для эвтектического сплава при температуре кристаллизации (одновременно существует две твердые и одна жидкая фаза) имеет *инвариантное равновесие*

$$C = 2 + 1 - 3(Ж + А + В) = 0.$$

Начало затвердевания происходит при температурах, отвечающих линии *acb*, которую называют линией *ликвидус*. При темпера-

турах, соответствующих линии *ac* кристаллизуются чистый компонент А, а по линии *cb* – чистый компонент В.

Полное затвердевание всех сплавов происходит при постоянной температуре t_3 , отвечающей на диаграмме состояния горизонтальной линии *dce*, которую называют *солидус*.

2.12. Диаграммы состояния двойных сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в жидком и твердом состоянии (II рода)

Диаграмма состояния сплавов с *неограниченной растворимостью компонентов в жидком и твердом состояниях* показана на рисунке 2.6.

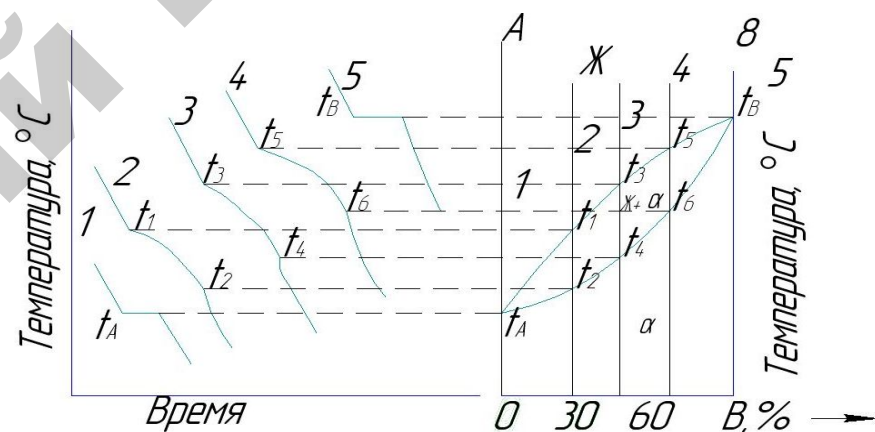


Рисунок 2.6. Кривые охлаждения и диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов А и В в жидком и твердом состояниях

Верхняя линия $t_A t_1 t_3 t_5 t_B$ (линия *ликвидус*) на рисунке 2.6 указывает температуры начала кристаллизации сплавов, а нижняя линия $t_A t_1 t_3 t_5 t_B$ (линия *солидус*) указывает на температуры окончания кристаллизации.

Выше линии *ликвидус* существует только жидкая фаза Ж. В области ниже линии *ликвидус* устойчив α-твердый раствор. В области между линиями *ликвидус* и *солидус* в равновесии находятся жидкая фаза и α-твердый раствор.

Построение диаграммы состояния методом термического анализа осуществляется по кривым охлаждения сплавов различной концентрации компонентов А и В (рисунок 2.6), на которых отмечаются точки перегибов, характеризующие начало и конец фазовых превращений. Примером может служить сплав $Cu-Ni$.

2.13. Диаграммы состояния двойных сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (III рода)

Построение диаграмм состояния сплавов, образующих *ограниченные твердые растворы*, приведено на рисунке 2.7. Диаграмма сочетает две рассмотренные диаграммы.

Линия $асв$ – линия *ликвидус*. При температурах, соответствующих линии $ас$ из жидкого сплава выделяются кристаллы α (твердый раствор компонента В в компоненте А), а по линии $св$ – кристаллы β (твердый раствор компонента А в компоненте В). Линия $адсев$ – линия *солидус*.

Точка d характеризует предельную растворимость компонента В в компоненте А, а точка e – предельную растворимость компонента А в компоненте В.

Сплавы, расположенные левее точки d и правее точки e , кристаллизуются так же, как и сплавы с *неограниченной растворимостью*.

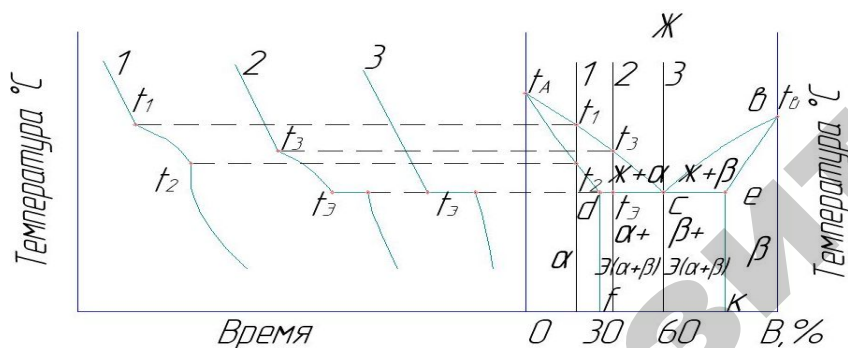


Рисунок 2.7. Кривые охлаждения и диаграмма состояния сплавов, образующих ограниченные твердые растворы

Кристаллизация сплава 3 (эвтектический сплав) осуществляется при постоянной температуре t_3 .

1. Сплавы, расположенные левее точки f , являются однофазными и состоят из одной α -фазы.

2. Сплавы, состав которых лежит между точками f и k , являются двухфазными и состоят из двух фаз – α и β .

3. Сплавы, расположенные правее точки k , являются однофазными и состоят из фазы β .

Структура доэвтектических двухфазных сплавов состоит из α -твердого раствора и эвтектики, заэвтектических – из β -твердого раствора и эвтектики. Структура сплава, концентрация которого соответствует точке c , представляет собой только зерна эвтектики.

2.14. Диаграммы состояния двойных сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии и перитектическим превращением

В отличие от предыдущей диаграммы, образующей эвтектику, для диаграммы с *перитектическим* превращением неинвариантное равновесие при одновременном существовании трех фаз (жидкости и твердых растворов α и β) характеризуется тем, что жидкость реагирует с ранее выделившимися кристаллами, например, α -твердой фазы, и образуется новый вид кристаллов твердой β -фазы. Образующаяся при кристаллизации кристаллов смесь $\alpha + \beta$ называют *перитектической*, или перитектикой. От эвтектики она отличается более грубым строением и представляет собой крупнозернистую механическую смесь кристаллов α и β .

2.15. Диаграммы состояния двойных сплавов с образованием устойчивого химического соединения (IV рода)

Диаграмма состояния сплавов, образующих *устойчивые химические соединения*, неограниченно растворимых в жидком состоянии, не растворимых в твердом состоянии, показана на рисунке 2.8.

Такая диаграмма может быть представлена как две простые диаграммы с кристаллизацией сплавов, образующих механическую смесь кристаллов чистых компонентов и химического соединения.

Диаграмма имеет одну жидкую и три твердые фазы: А, В и A_nB_m . Структурные составляющие твердых сплавов приведены на диаграмме. Возникшее химическое соединение A_nB_m является компонентом и делит диаграмму состояния на две: А – A_nB_m и A_nB_m – В. Тип диаграммы зависит от свойств компонентов А, В и A_nB_m .

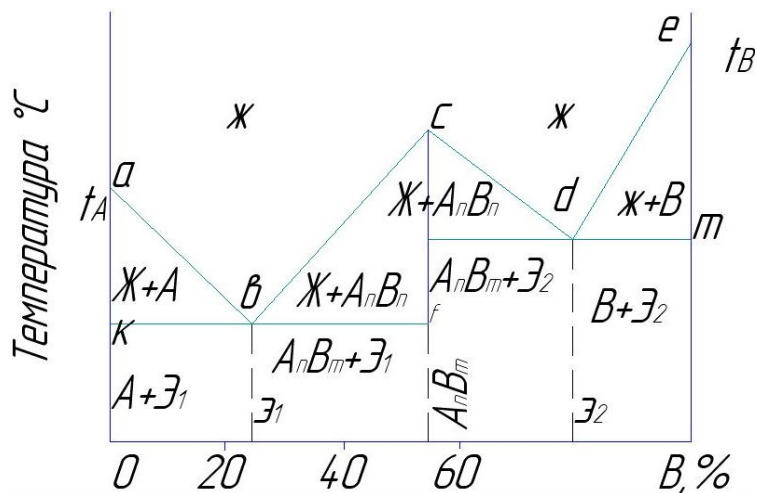


Рисунок 2.8. Диаграмма состояния сплавов с устойчивым химическим соединением

2.16. Закон Н. С. Курнакова для двухкомпонентных сплавов

Русский академик Н. С. Курнаков впервые установил, что между составом и структурой сплава, определяемой типом диаграммы состояния, и свойствами сплава существует определенная графическая зависимость (рисунок 2.9). В основу построения зависимостей положен разработанный им физико-химический анализ, который является главным методом изучения сплавов и широко используется при исследовании происходящих в них структурных превращений при нагреве и охлаждении.

На рисунке 2.9 приведены следующие четыре случая:

а) в случае образования механических смесей свойства сплава изменяются по **линейному закону**;

б) при образовании неограниченных твердых растворов свойства сплава изменяются по **криволинейной зависимости**, причем некоторые свойства (например, электрическое сопротивление) могут сильно отличаться от свойств компонентов;

в) в случае образования ограниченных твердых растворов, свойства в интервале концентрации, отвечающем однофазным твердым растворам, изменяются по **криволинейной зависимости**, а в двухфазной области диаграммы – по **прямолинейному закону**;

г) в случае образования химического соединения на диаграмме «концентрация – свойство» составу химического соединения соответствует **максимум** указанных свойств.

Существует также определенная связь между диаграммой состояния и технологическими, в частности, литейными свойствами. Эвтектические сплавы обладают высокой жидкотекучестью и малой усадкой, однако пластичность их невысока (чугуны). Наоборот, сплавы в области однофазных твердых растворов пластичны, хорошо коуются и прокатываются (например, стали).

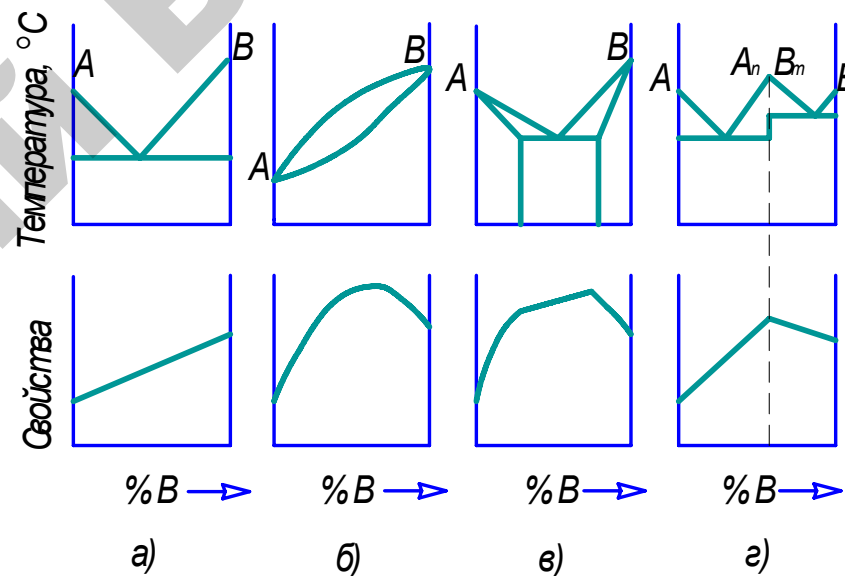


Рисунок 2.9. Схема зависимости свойств двухкомпонентных сплавов от типа диаграммы состояния

ГЛАВА 3

ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ

3.1. Железо и его свойства

Железо – металл серебристо-серого цвета, атомный номер 26, атомная масса 55,65, плотность его при комнатной температуре составляет $7,86 \text{ г/см}^3$. Температура плавления железа 1539°C . Твердость железа 50–60 НВ, предел прочности 200–250 МПа, пластичность (относительное удлинение) 50–60 %.

На практике применяется технически чистое железо, т. к. обычно железо всегда содержит примеси, в котором суммарное количество примесей не превышает 0,1–0,2 %, в т. ч. углерода 0,02 %. Механические свойства железа зависят от степени его чистоты. Железо обладает allotропией.

3.2. Кривая охлаждения чистого железа

Кривая охлаждения чистого железа образует четыре горизонтальные площадки (рисунок 3.1). При температуре 1539°C происходит кристаллизация металла с образованием первой площадки. Образуются кристаллы с кубической объемно-центрированной ячейкой, параметры решетки $a = 0,293 \text{ нм}$ (2,93 Å). Для его модификации при температуре выше 1392°C – решетка ОЦК используется обозначение « δ -железо».

Вторая горизонтальная площадка при температуре 1392°C отражает процессы перекристаллизации $\alpha (\delta)$ ОЦК $\Leftrightarrow \gamma$ ГЦК. γ -железо имеет кристаллическую решетку с ячейкой в виде гранцентрированного куба с параметром решетки $0,365 \text{ нм}$ (3,65 Å).

Третья площадка на кривой охлаждения при 910°C характеризует процесс перекристаллизации $\gamma \Leftrightarrow \alpha$. α -железо при температуре ниже 910°C имеет кристаллическую решетку с ячейкой в виде объемно-центрированного куба ОЦК с параметром $a = 0,286 \text{ нм}$ (2,86 Å). Иногда парамагнитное железо обозначают $\beta (\alpha)$.

Четвертая площадка при температуре 768°C – A_{r2} – точка Кюри соответствует магнитному превращению, т. е. переходу из парамагнитного в ферромагнитное состояние. Тип кристаллической решетки во время магнитного превращения не меняется, остается ОЦК, изменяются только параметры решетки, $a = 0,28 \text{ нм}$ (2,8 Å).

3.3. Аллотропические формы железа и их свойства

Железо относится к полиморфным металлам. Железо известно в двух основных аллотропических формах α и γ . α -железо существует при температурах ниже 910°C и выше 1392°C . γ -железо существует в интервале температур 910 – 1392°C . Изменение типа кристаллической решетки обуславливает изменение свойств железа.

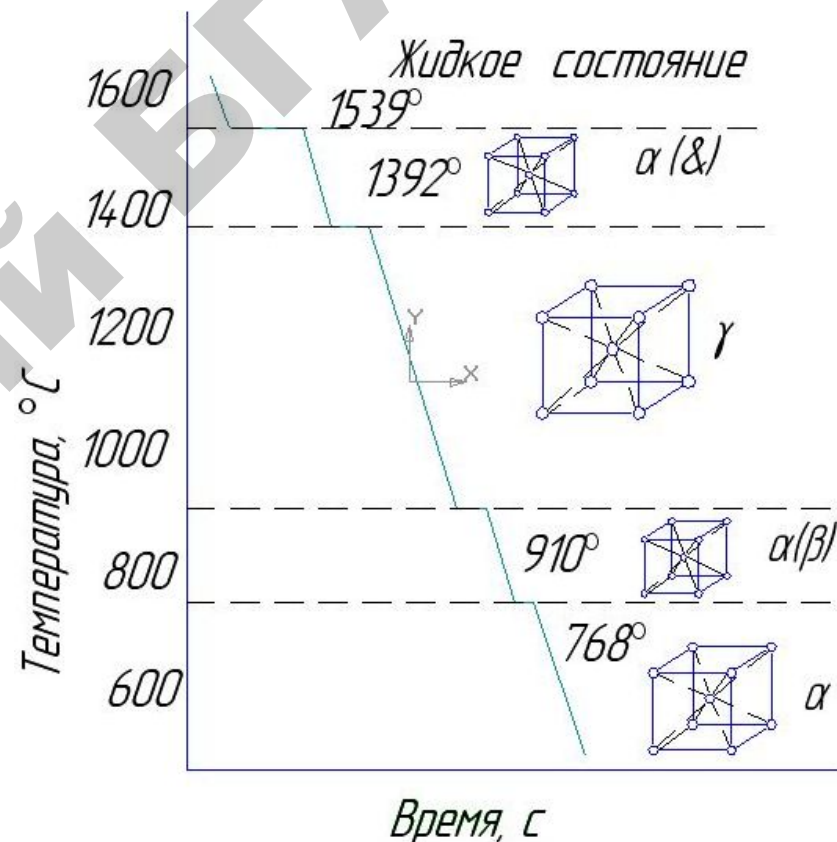


Рисунок 3.1. Кривая охлаждения чистого железа

При температуре 1539°C образуются кристаллы с кубической объемно-центрированной ячейкой, параметры решетки $a = 0,293 \text{ нм}$. Тип

кристаллической решетки ОЦК совпадает с типом решетки чистого железа при температуре ниже $910\text{ }^{\circ}\text{C}$, а параметры решетки различаются.

γ -железо имеет кристаллическую решетку с ячейкой в виде гранцентрированного куба с параметром решетки $0,365\text{ нм}$. Плотность γ -железа выше, чем α -железа, равна $8,0\text{--}8,1\text{ г/см}^3$.

α -железо при температуре ниже $910\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеет кристаллическую решетку с ячейкой в виде объемно-центрированного куба ОЦК с параметром $a = 0,286\text{ нм}$, его плотность $7,83\text{ г/см}^3$.

3.4. Углерод и его свойства

Углерод – неметаллический элемент, атомный номер 6, атомная масса 12; кристаллическая структура слоистая, расстояние между плоскостями $0,34\text{ нм}$. Существует в двух кристаллических модификациях: алмаз и графит.

Графит обладает очень низкой твердостью, прочностью, пластичностью ($0,5\text{--}1,0\%$). Плотность $2,5\text{ г/см}^3$, температура плавления $3500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кристаллическая решетка графита гексагональная, имеет высокие электро- и теплопроводность, а также химическую стойкость. Его образование характерно для высокоуглеродистых сплавов при малых скоростях охлаждения.

В металлических сплавах углерод присутствует в свободном состоянии в виде графита или химического соединения с железом – **цементита** (карбида железа Fe_3C).

3.5. Цементит и его свойства

Углерод может также соединяться с железом, образуя неустойчивое химическое соединение Fe_3C , называемое **цементитом**, которое может быть вторым компонентом в системе этих сплавов. Цементит содержит $6,67\%$ углерода.

Цементит тверд ($\cong 800\text{ НВ}$) и хрупок ($\delta \cong 0$), прочность его на растяжение невысока ($\sigma_{\text{в}} \cong 40\text{ МПа}$). Образование цементита в сплавах железа с углеродом происходит при сравнительно высоких скоростях охлаждения.

3.6. Диаграмма состояния сплавов «железо – цементит»

Диаграмма «железо – цементит» является диаграммой **метастабильного равновесия** системы $\text{Fe}\text{--}\text{Fe}_3\text{C}$. В условиях производства в результате ускоренного процесса кристаллизации обычно образу-

ется цементит. Метастабильная диаграмма состояния $\text{Fe}\text{--}\text{Fe}_3\text{C}$ поясняет фазовые и структурные превращения в сталях и белых чугунах.

Каждая точка диаграммы состояния $\text{Fe}\text{--}\text{Fe}_3\text{C}$ (рисунок 3.2) характеризует строго определенный состав сплава при соответствующей температуре и концентрации. Точка A ($1539\text{ }^{\circ}\text{C}$) отвечает температуре плавления железа, точка D ($1250\text{ }^{\circ}\text{C}$) – температуре плавления цементита, точки N ($1392\text{ }^{\circ}\text{C}$) и G ($910\text{ }^{\circ}\text{C}$) соответствуют полиморфному превращению $\alpha \leftrightarrow \gamma$ (рисунок 3.1), т. е. компонентам, а ординаты между ними – двойным сплавам.

Линия $ABCD$ – линия **ликвидус**. Выше этой линии все железоуглеродистые сплавы находятся в жидком состоянии, представляющем собой жидкий раствор – жидкую фазу (Ж) (рисунок 3.2).

Линия $ANIECF$ – линия **солидус**. Ниже этой линии все сплавы находятся в твердом состоянии. Все остальные линии ниже линии **солидус** отражают начало или конец фазовых превращений в твердом состоянии.

Горизонтальные линии отвечают трехфазным равновесным состояниям сплавов ($C = 2 + 1 - 3 = 0$).

Во всех железоуглеродистых сплавах с концентрацией $C > 0,02\%$ происходит **эвтектоидное** превращение при температуре $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ (прямая PSK), заключающееся в распаде аустенита на дисперсную механическую смесь чередующихся пластинок Φ и Ψ , которую называют **перлитом**.

В сплавах с содержанием углерода от $2,14$ до $6,67\%$ C при $1147\text{ }^{\circ}\text{C}$ (линия ECF) происходит **эвтектическое** превращение: из жидкой фазы одновременно выпадают кристаллы A и Ψ . Такая механическая смесь называется **ледебуритом**.

В сплавах от $0,1$ до $0,5\%$ C при $1499\text{ }^{\circ}\text{C}$ (линия HIB), происходит **перитектическая** реакция, когда из жидкой фазы и феррита образуется аустенит.

Диаграмма сплавов «железо – цементит» имеет два компонента: железо и цементит; четыре фазы: жидкий сплав (Ж), цементит (Ψ), феррит (Φ) и аустенит (A).

3.7. Фазовый состав железоуглеродистых сплавов

Диаграмма сплавов «железо – углерод» имеет пять фаз: жидкий сплав (Ж), феррит (Ф), аустенит (А), цементит (Ц) и графит (Гр.).

Растворимость углерода в кристаллических решетках железа с объемно-центрированной кубической ячейкой и гранецентрированной ячейкой сильно различается, что создает большие возможности для изменения механических свойств сплавов железа с углеродом посредством термической обработки. Твердые растворы представляют собой две различные фазы (феррит и аустенит), вероятность существования которых определяется температурой и концентрацией сплавов.

Феррит – это твердый раствор внедрения углерода в α -железе. В диаграмме «железо – углерод» (рисунок 3.2) существование феррита возможно ниже линии *GSK*. Высокотемпературный феррит (δ -феррит) существует в зоне *ABIN*. Максимальная растворимость углерода в феррите не превышает 0,02 %, минимальная при комнатной температуре – 0,006 %.

Аустенит – это твердый раствор углерода в γ -железе. Существование аустенита возможно в зоне *NIESG* (рисунок 3.2). Максимальная растворимость углерода в аустените достигает 2,14 % при температуре 1147 °С, минимальная – 0,8 % С при 727 °С; ниже 727 °С аустенит распадается. Растворенный углерод, как и другие примеси, упрочняют аустенит, механические свойства которого значительно выше, чем у феррита (например, 160–200 НВ).

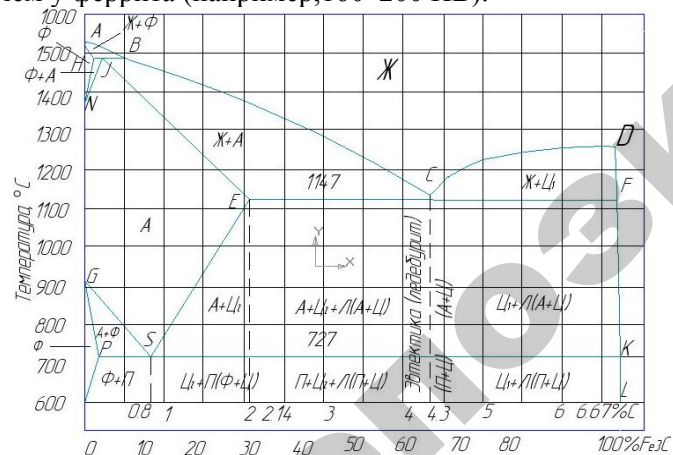


Рисунок 3.2. Диаграмма состояния сплавов системы «железо – цементит»

Цементит в диаграмме состояния сплавов является и **компонентом**, и **фазой**. Образование цементита в сплавах железа с углеродом происходит при сравнительно высоких скоростях охлаждения. Если же сплав охлаждается медленно, то вероятно образование более стабильной фазы – **графита**, который представляет собой углерод в чистом виде.

Цементит может образовываться при охлаждении из жидкой и твердой фаз. Цементит, образующийся из жидкой фазы, называется **первичным**, из аустенита – **вторичным**, из феррита – **третичным**.

Фазовые изменения в железоуглеродистых сплавах связаны с полиморфизмом железа и изменением растворимости углерода в аустените и феррите с понижением температуры.

3.8. Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов и их свойства

Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов при нормальной температуре: феррит, перлит, ледебурит, цементит и графит.

Свойства феррита практически не отличаются от свойств технически чистого железа: $\sigma_b = 250$ МПа; $\delta = 50$ %; $\Psi = 80$ %.

Перлит (П) – эвтектоид, представляющий собой механическую смесь пластинчатых Ф и Ц при содержании углерода 0,8 % С, структурная составляющая, получившая название за блеск перламутра на подготовленном микрошлифе. Характеризуется хорошей обрабатываемостью, невысокой твердостью 180–220 НВ; достаточной прочностью $\sigma_b = 800$ –900 МПа и пластичностью $\delta = 16$ %.

Ледебурит (Л) – это эвтектика, механическая смесь двух твердых фаз – аустенита и цементита. Ледебурит имеет либо зернистое, либо пластинчатое строение и характеризуется высокой хрупкостью. Механические свойства ледебурита: $\sigma_b = 1000$ МПа; $\delta = 1$ –2 %.

Железоуглеродистые сплавы, имеющие в своей структуре ледебурит, обладают низкими пластическими свойствами, их трудно деформировать. Ледебурит в структуре сплавов появляется при содержании углерода 2,14 %. Эта граница (точка E) и является линией раздела железоуглеродистых сплавов на две большие группы: **стали** и **чугуны**.

3.9. Кривые охлаждения железоуглеродистых сплавов

Кристаллизация некоторых сплавов, содержащих различное количество углерода, изображена в виде кривых охлаждения на рисунке 3.3.

Сплав 1, содержащий 0,6 % углерода, начинает кристаллизоваться при температуре t_1 появлением первых кристаллов аустенита. На кривой охлаждения сплава 1 фиксируется точка перегиба, связанная с замедлением охлаждения сплава. Заканчивается кристаллизация при температуре t_2 . Структура закристаллизовавшегося сплава – аустенит (А).

Сплав 2, содержащий 0,8 % углерода, кристаллизуется в интервале температур от t_5 до t_6 . Структура закристаллизовавшегося сплава – аустенит.

Сплав 3, содержащий 1,3 % углерода, начинает кристаллизоваться при температуре t_7 . Первые кристаллы – аустенит с содержанием углерода, соответствующим точке пересечения горизонтальной линии, исходящей из точки t_7 , и линии *солидус*. При снижении температуры сплава доля закристаллизовавшегося аустенита повышается, содержание углерода в аустените изменяется соответственно линии *солидус*, содержание углерода в жидкой фазе изменяется соответственно линии *ликвидус*. Заканчивается кристаллизация при температуре t_9 . Структура закристаллизовавшегося сплава – аустенит.

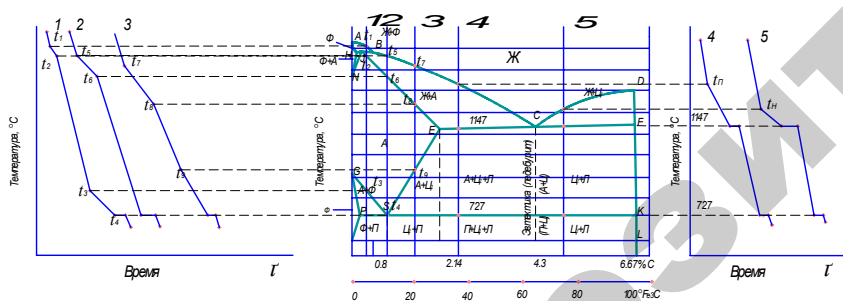


Рисунок 3.3. Диаграмма состояния сплавов $Fe-Fe_3C$ и кривые охлаждения сталей (а), чугунов (б)

Кристаллизация сплава 4, содержащего 2,5 % углерода, начинается при температуре t_{11} появлением кристаллов аустенита. С по-

нижением температуры содержание углерода в жидкой фазе повышается. При достижении температуры t_{13} содержание углерода в жидкой фазе составляет 4,3 %, что соответствует точке эвтектического превращения С. Оставшаяся часть жидкого сплава кристаллизуется при постоянной температуре $t_{13} = 1147^\circ C$ сразу в две твердые фазы: **аустенит** и **цементит**. Структура закристаллизовавшегося сплава 4 – аустенит А и ледебурит Л (А + Ц).

Кристаллизация сплава 5, содержащего 5 % углерода, начинается при температуре t_{14} выделением кристаллов цементита, который называют первичным, отражая его появление из жидкой фазы. С понижением температуры доля твердой фазы (цементита) увеличивается, содержание углерода в жидкой фазе понижается. При достижении температуры t_{15} содержание углерода в жидкой фазе составит 4,3 %, оставшаяся часть жидкого сплава имеет эвтектическую концентрацию и кристаллизуется при постоянной температуре. На кривой охлаждения 5 это отражается образованием горизонтальной площадки. Структура закристаллизовавшегося сплава – цементит Ц и ледебурит Л (А + Ц).

3.10. Значение диаграммы состояния сплавов «железо – цементит»

Метастабильная диаграмма состояния сплавов «железо – цементит» объясняет превращения в сталях и белых чугунах, является основанием для выбора режимов термической обработки и обработки давлением железоуглеродистых сплавов. Наличие тех или иных фаз и структурных составляющих определяет физико-механические и технологические свойства сталей и чугунов.

Стали являются деформируемыми сплавами, они подвергаются ковке, прокатке, штамповке и т.д. Чугуны деформации, как правило, не подвергаются, зато они обладают хорошими литейными свойствами, т.к. в структуре у них есть эвтектика – ледебурит.

3.11. Диаграмма состояния «железо – графит»

Диаграмма состояния сплавов «железо – графит» (стабильное равновесие). Образование стабильной фазы графита в чугуне может происходить при медленном охлаждении в результате непосредственного его выделения из жидкого раствора или вследствие распада предварительно образовавшегося цементита.

УГЛЕРОДИСТЫЕ ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ. ЧУГУНЫ

4.1. Влияние углерода на структуру стали

Углеродистая сталь – сплав железа с углеродом до 2,14 % с постоянными примесями: марганца (до 0,8 %), кремния (до 0,5 %), серы (до 0,06 %), фосфора (до 0,07 %) и газов (кислорода, водорода, азота), присутствующих в тысячных долях процента, которые оказывают влияние на ее структуру и свойства.

С увеличением содержания углерода, изменяется структура стали. При содержании углерода меньше 0,8 % структура состоит из феррита и перлита. Сталь с 0,8 % углерода состоит из одного перлита (П); если больше 0,8 %, то кроме перлита присутствует вторичный цементит (Ц).

Микроструктуры технически чистого железа и углеродистых сталей характеризуются левой нижней частью диаграммы состояния «железо – цементит». Сплавы с содержанием до 0,02 % углерода называются технически чистым железом, от 0,02 до 0,8 % C – **дозвтектоидными** сталями, с содержанием 0,8 % C – **эвтектоидной** сталью и с содержанием более 0,8 % C – **заэвтектоидными** сталями.

Микроструктура доэвтектоидной стали состоит из феррита и перлита. В доэвтектоидной стали после травления феррит выявляется в виде светлых полей, а перлит – в виде полей полосчатого строения. Микроструктура эвтектоидной стали состоит только из перлита. Заэвтектоидная сталь имеет структуру, состоящую из перлита и вторичного цементита, в виде белой сетки. Чем больше углерода в заэвтектоидной стали, тем более широкой получается цементитная сетка.

4.2. Влияние углерода на свойства сталей

Важнейший и основной элемент в сталях – углерод, вводимый специально и оказывающий существенное влияние на свойства сталей. С увеличением содержания углерода (и даже при его незначительном изменении) повышается прочность, твердость, снижается пластичность, ударная вязкость. Повышение содержания углерода оказывает влияние и на технологические свойства стали (ковкость,

Диаграмма состояния стабильного равновесия сплавов «железо – графит» показана на рисунке 3.4 (штриховые линии соответствуют выделению графита, сплошные линии – цементита).

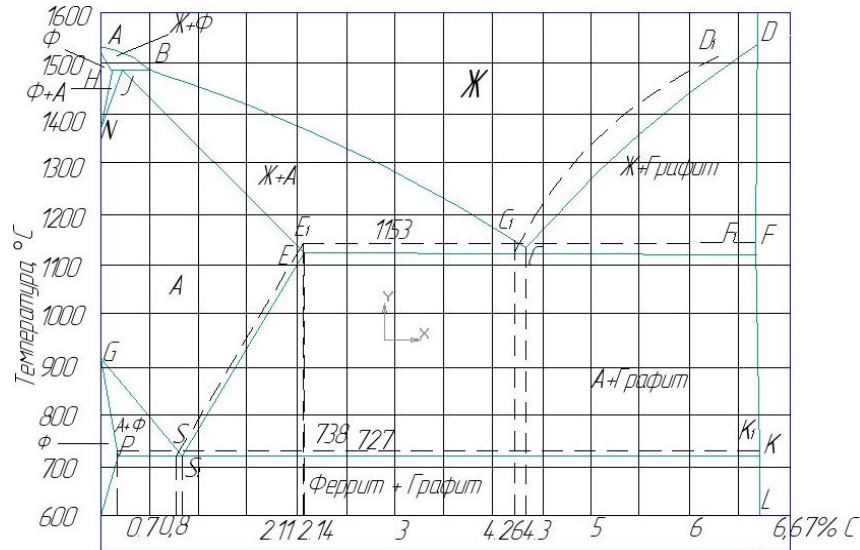


Рисунок 3.4. Диаграмма состояния сплавов системы «железо – углерод»

При температурах, соответствующих линии C_1D_1 , кристаллизуется первичный графит. При температуре 1153 °C и концентрации углерода 4,26 % образуется **графитная эвтектика**: аустенит и графит.

По линии E_1S_1 выделяется вторичный графит, а при 738 °C (линия S_1K_1) образуется **эвтектоид**, состоящий из феррита и графита.

Если при кристаллизации чугуна выделяется только графит, то чугун называют **серым**, если только цементит – **белым**. При наличии в структуре чугуна графита и цементита такой чугун называют **половинчатым**.

свариваемость и обрабатываемость уменьшаются, а литейные свойства увеличиваются).

Изменение соотношения в структуре стали пластичной (феррит) и твердой (цементит) фаз с увеличением содержания углерода (рисунок 4.1) является причиной повышения прочностных (σ_s , $\sigma_{0,2}$, НВ) и снижения пластических (δ , Ψ) характеристик. При содержании углерода больше 1,0–1,2 %, твердость стали в отожженном состоянии возрастает, а предел прочности уменьшается. Это объясняется выделением по границам бывшего зерна аустенита вторичного цементита. При испытании на растяжение образовавшийся вокруг зерен перлита каркас из цементита разрушается, приводя к снижению предела прочности. Механические свойства стали зависят от формы и размера цементитных включений.

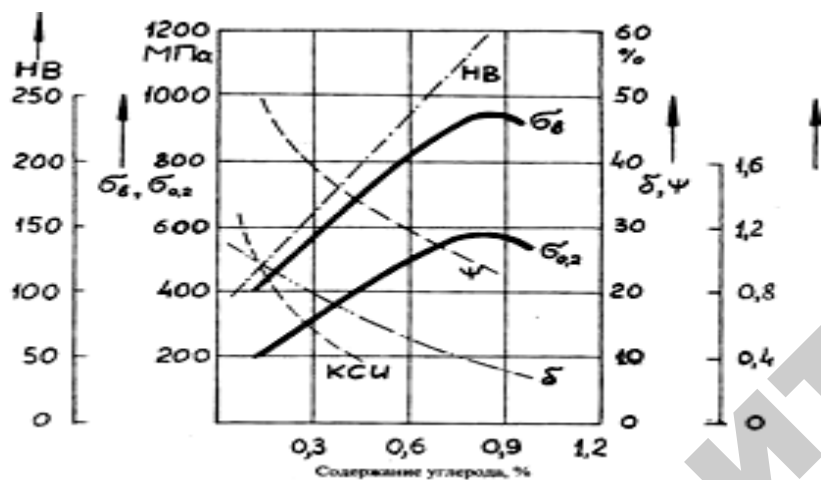


Рисунок 4.1. Влияние углерода на механические свойства стали

4.3. Влияние постоянных примесей на структуру и свойства сталей

МАРГАНЕЦ. Полезная примесь, его содержание составляет 0,5–0,8 %.

В структуре он не обнаруживается, растворяется в Ф и Ц. Повышает прочность и упругость стали.

КРЕМНИЙ. Действие кремния аналогично влиянию марганца и он структурно не обнаруживается, т. к. полностью растворим в Ф и П, повышает прочность сталей. Содержание кремния не более 0,4–0,5 %.

ФОСФОР. Фосфор попадает в металл из руд, топлива и флюсов, частично удаляется при выплавке стали. Фосфор растворяется в Ф, снижая его пластичность и повышая температуру перехода в хрупкое состояние, что вызывает *хладноломкость* сталей.

В отдельных случаях фосфор желателен, так как улучшает обрабатываемость стали резанием, а в присутствии меди повышается сопротивление коррозии. Уменьшить содержание фосфора до 0,01 % металлургическими приемами довольно трудно, это достигается использованием чистой исходной шихты.

СЕРА. Сера попадает в сталь, главным образом, из руд и печных газов (SO_2). Сера не растворима в железе. Любое количество серы с железом образует сульфид железа, который входит в состав легкоплавкой и хрупкой эвтектики (988 °С). Она делает сталь хрупкой при 800 °С, что называется *красноломкостью*. Сталь с повышенным содержанием серы не подвергается горячей обработке металлов давлением.

4.4. Классификация и маркировка углеродистых сталей

Классификация сталей производится по способу производства, химическому составу, назначению и качеству (рисунок 4.2).

По способу производства сталь делят на **конверторную**, **маргеновскую** и **электросталь**. Электросталь является наиболее чистой как по содержанию вредных примесей, так и по газовым и неметаллическим включениям. Этим способом выплавляют высококачественные марки углеродистой и легированной стали.

В зависимости от **способа раскисления** жидкой стали в правильном агрегате ее различают как **спокойную (сп)**, т. е. полностью раскисленную марганцем, кремнием и алюминием; **полуспокойную (пс)**, раскисленную марганцем и кремнием; **кипящую (кп)**, раскисленную только марганцем. Кипящая сталь (0,05–0,07 % Si) недостаточно раскислена (Si или Mn). В ней содержится повышенное количество FeO. Кипящие стали более дешевые, склонны к хладноломкости и хуже свариваются, но обладают высокой пластичностью, хорошо подвергаются вытяжке в холодном состоянии.

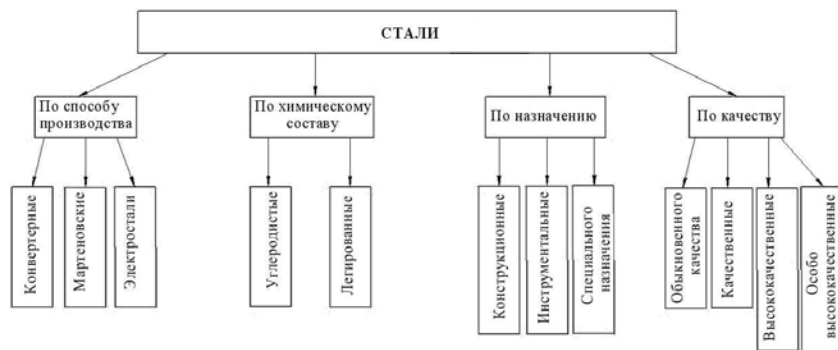


Рисунок 4.2. Общая классификация сталей

По химическому составу стали классифицируются на **углеродистые** и **легированные**.

В зависимости от содержания углерода углеродистые стали подразделяются на низкоуглеродистые (до 0,25 % C), среднеуглеродистые (0,25–0,60 % C) и высокоуглеродистые (свыше 0,60 % C).

По назначению углеродистые стали классифицируют на **конструкционные, инструментальные** и **специального назначения** (с особыми свойствами).

Конструкционные стали (0,05–0,70 % C) применяют в машиностроении и строительстве для изготовления деталей машин, элементов конструкций и сооружений. Важнейшими характеристиками сталей, по которым осуществляется их выбор, являются механические свойства.

Инструментальные стали (0,7–1,3 % C) служат для изготовления режущих, измерительных инструментов, штампов холодного и горячего деформирования. Основным требованием, предъявляемым к инструментальным сталям, является их высокая твердость, и, следовательно, износостойкость.

Стали специального назначения делятся на две группы — с особыми химическими и с особыми физическими свойствами.

По качеству углеродистые стали подразделяют на стали **обыкновенного качества, качественные** и **высококачественные**.

Качество стали определяется степенью однородности химического состава и строения, природой и содержанием неметаллических включений, газонасыщенностью и некоторыми другими фак-

торами. Основным показателем, лежащим в основе классификации сталей по качеству, является содержание вредных примесей — серы и фосфора. Чем меньше указанных примесей, тем выше качество.

Углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества являются наиболее дешевыми, выплавляются по нормам массовой технологии. В них допускаются повышенное содержание примесей (сера $\leq 0,05$ %, фосфор $\leq 0,04$ %), а также газонасыщенность и загрязненность неметаллическими включениями.

Эти стали предназначены для изготовления горячекатаного проката: сортового, фасонного, листового. Маркируются сочетанием букв «Ст» и цифр от 0 до 6, указывающими номер стали. С увеличением цифры возрастает количество углерода в стали и ее прочностные характеристики. Углеродистые стали обыкновенного качества получают следующих марок: Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6.

Стали обыкновенного качества могут быть кипящие (кп), полуспокойные (пс), спокойные (сп), цифры в их маркировке не указывают на содержание углерода.

Углеродистые качественные конструкционные стали маркируются цифрами по содержанию углерода в сотых долях: 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75. Они могут быть с обычным и повышенным содержанием марганца (обозначаются буквой Г в конце марки) и содержанием серы не более 0,04 %, фосфора не более 0,035 %.

Углеродистые инструментальные стали выпускаются качественными (содержание серы не более 0,028 %, фосфора $< 0,030$ %) или высококачественными (содержание серы не более 0,018 %, фосфора $< 0,025$ %). В марке буква «У» обозначает углеродистую сталь, буква «А» — высококачественную, цифры показывают среднее содержание углерода в десятых долях процента.

Качественные инструментальные стали – У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13.

Высококачественные углеродистые стали – У7А, У8А, У9А, У10А, У11А, У12А, У13А.

К углеродистым специальным сталям относятся нагартованные, листовые для холодной штамповки, автоматные и другие углеродистые стали специального назначения.

Нагартованная сталь применяется для изготовления изделий прокаткой, волочением, прессованием в холодном состоянии. В результате такой обработки металл получает нагартовку (наклеп)

с высокой степенью обжатия-деформации (96–97 %). Обычно применяется сталь с 0,6–0,8 % углерода для изготовления проволоки с прочностью 180–300 кгс/мм². Используется для канатов, тросов, корда.

Листовая сталь для холодной штамповки обладает большой пластичностью, что характерно для сталей с малым содержанием углерода (05, 05кп, 08кп, 08, 10, 10кп). Для особо сложной штамповки содержание углерода ограничивается 0,08 %. Существенно ограничено содержание других постоянных примесей (марганца, кремния, серы, фосфора).

Автоматные стали применяются для изготовления деталей на станках-автоматах, в основном, обработкой резанием. Для массового изготовления малоответственных деталей, не работающих при больших нагрузках, применяют автоматные низкоуглеродистые стали с повышенным содержанием серы и фосфора: А12, А20, А30 и др. ФОСФОР и СЕРА способствуют получению лучше обработанной поверхности, повышению стойкости инструмента, а также образованию ломкой мелкой стружки. Числа показывают среднее содержание углерода в сотых долях (серы до 0,2 %, фосфора до 0,15 %). Отрицательные свойства автоматных сталей: малая сопротивляемость коррозии; пониженная динамическая прочность. Имеются и другие элементы, улучшающие обрабатываемость, например, селен, теллур.

4.5. Применение углеродистых сталей

в сельскохозяйственном машиностроении, строительстве и ремонтном производстве

Углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества широко применяются в сельскохозяйственном машиностроении, строительстве и ремонтном производстве для изготовления неответственных сварных, клепаных и болтовых конструкций, режущих – малонагруженных деталей машин (валы, оси, шестерни). Поставляются в виде уголков, швеллеров, прутков, листов, балок. В строительстве используются для изготовления неответственных элементов конструкций (балки, фермы, конструкции подъемных кранов). Чем выше цифра в маркировке стали, тем выше прочность.

Углеродистые конструкционные качественные стали применяются для изготовления более ответственных деталей сельскохозяйственных машин и оборудования.

Стали 08, 10кп, 15кп – пластичные без термической обработки, применяются для изготовления кузовных деталей грузовых автомобилей, сельскохозяйственной техники методом листовой холодной штамповки.

Стали 10, 15, 20, 25 – цементируемые стали, применяются для деталей, требующих твердости и износостойкости поверхности при сохранении вязкой сердцевины, – валики, шестерни, ножи.

Стали 35, 40, 45, 50 – улучшаемые стали для изготовления валов, осей, втулок, шестерен, шатунов, поршневых пальцев сельскохозяйственной техники, требующих высокой прочности при удовлетворительной вязкости.

Стали 55, 60, 55Г, 60Г – пружинно-рессорные стали для деталей высокой прочности и упругости. После закалки и отпуска наилучшие механические свойства у сталей 55Г, 60Г.

Стали 65, 70, 75, 65Г, 70Г, 75Г – для деталей, требующих высокой износостойкости при абразивном изнашивании (долота, лемеха, лапы культиваторов, диски посевных и почвообрабатывающих машин).

Инструментальные углеродистые стали применяют для изготовления режущего и мерительного инструмента небольшого сечения после закалки и низкого отпуска. Их можно использовать только для резания материалов с небольшой скоростью резания, а также для изготовления штампов холодного деформирования пластичных материалов. Их твердость сильно уменьшается при нагреве выше 190–200 °С. Примерное назначение:

У7, У8, У9, У7А, У8А, У9А – для инструмента по дереву, зубила, долота;

У10, У11, У10А, У11А – мелкие сверла, фрезы, метчики, развертки;

У12, У13, У12А, У13А – для инструментов с максимальной износостойкостью, напильники, гравёрный инструмент.

4.6. Классификация и маркировка легированных сталей

Легированная сталь – сплав железа с углеродом до 2,14 % и постоянными примесями, в состав которой (для придания тре-

буемых свойств) дополнительно входят специально введенные легирующие элементы: хром, никель, молибден, вольфрам и т. д. Сталь также будет считаться легированной, если содержание в ней кремния превысит 0,5 %, а марганца – 1,0 %. В зависимости от содержания легирующих элементов (Л. Э.) различают стали низколегированные (суммарное содержание легирующих элементов до 2,5 %), среднелегированные (2,5–10 %) и высоколегированные (более 10 %).

КЛАССИФИКАЦИЯ. Легированные стали классифицируются по следующим признакам: по назначению; по качеству; по химическому составу; по равновесной структуре; по структуре при охлаждении на воздухе.

По **назначению** легированные стали делятся на конструкционные, инструментальные и специального назначения. По **качеству** эти стали подразделяют на качественные, высококачественные, особо высококачественные.

В зависимости от **химического состава** стали делятся на марганцовистые, никелевые, хромистые, хромоникелевые и т. д.

Классификация по **равновесной структуре** при медленном охлаждении.

1. Доэвтектоидные стали, имеющие в структуре избыточный феррит.
2. Эвтектоидные – стали, имеющие перлитную структуру (0,8 % С).
3. Заэвтектоидные – стали, имеющие в структуре избыточные карбиды.
4. Ледебуритные – стали, имеющие в структуре первичные карбиды, выделившиеся из жидкой стали.

Классификация **по структуре после охлаждения на воздухе.** Стали подразделяются на 3 основных класса, что связано с кинетикой распада аустенита:

- 1) перлитные с относительно низким содержанием Л. Э. (П);
- 2) мартенситные с более значительным содержанием Л. Э. (М);
- 3) аустенитные с высоким содержанием Л. Э. (А).

МАРКИРОВКА. В ГОСТах принята система обозначения, состоящая из небольшого числа цифр и букв, которые указывают на состав легированной стали. Первые цифры показывают среднее содержание углерода в сотых долях % для конструкционных сталей (в десятых долях для инструментальных сталей). Цифры после буквы указывают на примерное содержание легирующих элементов. При содержании легирующих элементов менее 1 % цифра не ста-

вится. Например, сталь состава 0,10–0,15 % углерода и 1,3–1,7 % марганца обозначается 12Г2, сталь с 0,28–0,35 % углерода, 0,8–1,1 % хрома, 0,9–1,2 % марганца, 0,8–1,2 % кремния – 30ХГС. Для высококачественных сталей (с ограниченным количеством серы меньше 0,03 %, фосфора меньше 0,03 %) в конце обозначения ставится буква «А».

Основные Л. Э. – Ni, Cr, V, W, Mo, Co, Ti, Nb, Al, Cu, Mn, Si, B, P, Zr, N. Их обозначение – H, X, Ф, В, М, К, Т, Б, Ю, Д, Г, С, Р, П, Ц, А.

Некоторые стали обозначаются условными буквами: Р – быстрорежущая; Ш – шарикоподшипниковая; Э – электротехническая. Нестандартные марки обозначают различным образом. Например, на заводе «Электросталь» опытные марки обозначаются буквой «И», пробные – «П».

4.7. Применение легированных сталей

Конструкционные стали – это стали, идущие на изготовление деталей и механизмов машин. Они подразделяются на **машиностроительные** (для изготовления деталей машин), как правило, подвергаемые термической обработке, и **строительные** (для изготовления строительных конструкций) стали.

Машиностроительные конструкционные легированные стали используются для деталей машин, испытывающих изгибающие (крутящие) нагрузки, применяются **цементуемые** (низкоуглеродистые) стали с содержанием углерода 0,10–0,25 %. После цементации, закалки и отпуска получают твердый поверхностный слой и вязкую сердцевину. Твердость поверхности составляет 60 HRC, сердцевины – 15–30 HRC. Подразделяются на низколегированные стали со слабо упрочняемой сердцевиной – 15Х, 20Х, 20ХН и др., $\sigma_b = 50–60 \text{ кг/мм}^2$, $\delta = 30 \%$, 140–180 НВ; легированные с сердцевиной, сильно упрочняемой при термообработке (с повышенным содержанием углерода 0,25–0,30 %) – 30ХГТ, 20ХГР, 20ХНР, 18ХГТ со сравнительно невысоким содержанием легирующих элементов, $\sigma_b = 130–160 \text{ кг/мм}^2$, $\delta = 10–15 \%$, 300–380 НВ.

Улучшаемые (среднеуглеродистые) стали 38ХМЮА, 40ХН, 40ХНМ, 42ХМФ используются, когда детали машин подвергают высоким нагрузкам. Для обеспечения необходимых свойств их подвергают закалке и высокому отпуску. Стали имеют структуру зернистого сорбита, обеспечивающего им лучшее сочетание прочности и вязкости. Содержат 0,3–0,4 % углерода и разное количество

Л. Э. Cr, W, Mn, Ni, Mo (в сумме 3–5 %) и часто до 0,1 % измельчителей зерна – Ti, V, Nb. Термическая обработка – закалка в масле и высокий отпуск 550–600 °С. Чем больше легирующих элементов, тем больше ее прокаливаемость. Для больших сечений выбирают марки более легированных сталей.

Высокопрочные стали с 0,3–0,4 % С, обработанные на высокую прочность > 160 кг/мм², соответствующие современным требованиям техники, получают путем легирования никелем, кобальтом, а также специальной термической обработкой ВТМО (высокотермомеханической обработкой). К ним относятся: а) мартенситостареющие стали, например, Н18К8М3; б) трип-стали с высокой пластичностью и др.

К конструкционным машиностроительным сталям относят также **пружинные стали** с особыми упругими свойствами – 65Г, 60С, 50С2, 50ХФА; **шарикоподшипниковые** – ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ, имеющие 0,9–1,5 % С и хром в десятых долях процента.

Строительные стали предназначены для изготовления строительных конструкций – мостов, газо- и нефтепроводов, ферм, котлов, которые в основном сварные. Это низколегированные стали с содержанием углерода меньше 0,22–0,25 %. Повышение прочности достигается дешевыми элементами – марганцем и кремнием. Предел текучести до 40–50 кг/мм². Не подвергаются термической обработке. Их применяют в виде листов, сортового проката.

Арматурная сталь выпускается в виде прутков (гладкие, профильные) и проволоки для армирования железобетонных конструкций высокой прочности, т. к. в предварительно напряженной конструкции металл испытывает значительные напряжения. Арматурная сталь 45С, 80С, 35ГС делится на 8 классов прочности и обозначается (А 1, 2...8). При низком содержании углерода (меньше 0,26 %) сталь хорошо сваривается.

Стали специального назначения (стали и сплавы с особыми свойствами) – с резко выраженными свойствами: нержавеющие, жаропрочные, износоустойчивые, с особыми магнитными и электрическими свойствами и др. Их работоспособность оценивается не только механическими, но и другими их свойствами.

Жаростойкие и жаропрочные стали обладают стойкостью против химического разрушения при температуре больше 550 °С; повышенными механическими свойствами при высоких температурах. К ним относятся стали 12Х17, 12Х18Н9, ХН32Т и др.

Коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали и сплавы, устойчивые к электрохимической коррозии, подразделяются на хромистые и хромоникелевые.

Хромистые нержавеющие стали 0Х13, 1Х13, 12Х17, 15Х25Т содержат 13, 17–18, 25–28 % хрома, имеют высокую сопротивляемость к электрохимической коррозии в обычных атмосферных условиях, пресной и морской воде. Стали с содержанием меньше 0,2 % углерода и 13 % хрома в отожженном состоянии с повышенной пластичностью используют для изготовления деталей, работающих с ударными нагрузками (клапаны, арматура). Стали с 0,3–0,4 % углерода после закалки имеют высокую твердость и прочность. Стали с 25–28 % хрома 15Х25Т, 15Х28 применяют для деталей, работающих при высоких температурах, равных 1050–1150 °С (чехлы, реторты, муфеля).

Хромоникелевые нержавеющие стали 12Х18Н8Т, 12Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х16Г8Н2Т и др. относят к сталям аустенитного класса, с низким содержанием углерода до 0,15 % и содержат 18–25 % хрома и 8–20 % никеля. Их используют как коррозионно-стойкие материалы для изделий и сварных конструкций, не подверженных межкристаллической коррозии, работающих во влажном воздухе, воде, растворах солей, щелочей, кислот. С добавками Ti, Nb они превосходят хромистые стали.

Кислотостойкие стали, имеющие увеличенную стойкость в кислотах (общая коррозия), которая повышается присадкой молибдена, особенно с медью при одновременном увеличении содержания никеля. Это стали типа Cr–Ni–Mo, Cr–Ni–Mo–Cu, например, 10Х17Н13М2Т (ЭИ448).

Криогенные стали для машин и оборудования, эксплуатируемых при пониженных температурах -80– -180 °С. Эти стали делят на стали северного исполнения до -60 °С и криогенные стали от комнатных температур до -80 °С и ниже типа Х18Н10, Х18Н20. Основное требование – механическая прочность при низких температурах.

Износостойкие стали включают **графитизированную** сталь с высоким содержанием С (1,50–1,75 %) и Si (0,7–1,6 %), обладающую высокой стойкостью против износа, например, марок ЭИ293, ЭИ366. Графит получается за счет частичного распада цементита; **высокомарганцовистую сталь** аустенитного класса (сталь Гадфильда) – 110Г13Л с 1,1–1,3 % С, 11–12 % Mn для изготовления

деталей, работающих в условиях высоких давлений, ударных нагрузок одновременно с истиранием (гусеничные траки, железнодорожные стрелки, зубья ковшей и т.п.). Применяется в литом состоянии, реже – деформированном, термическая обработка – закалка в воду. Сталь имеет высокую вязкость, пластичность, повышенную износоустойчивость при относительно небольшой твердости 200–250 НВ.

Электротехнические стали отличаются легкой намагничиваемостью, подразделяются на магнитомягкие стали типа ЭИ2 с ферритной структурой с содержанием 0,04–0,10 % С и до 4,8 % Si для трансформаторов; магнитотвердые стали ЕХ2, ЕХ3 с содержанием 1,2–1,4 % С, имеющие высокое значение коэрцитивной силы и остаточной индукции для изготовления постоянных магнитов, мартенситного класса.

Существуют и другие виды легированных сталей, особенно специального назначения, например, стали с особыми тепловыми свойствами, немагнитные стали и т. п.

4.8. Влияние химического состава и скорости охлаждения на структуру и свойства чугуна

Чугун – сплав железа с углеродом с содержанием углерода свыше 2,14 % и наличием постоянных примесей. На структурообразование чугуна влияет скорость охлаждения и количество элементов, способствующих процессу образования графитных включений.

Свойства чугунов определяются структурой металлической основы, формой, размером и количеством графитных включений, которые зависят, главным образом, от содержания углерода. С повышением содержания углерода ухудшаются механические характеристики, но улучшаются литейные свойства чугуна. Поэтому его содержание не превышает 4,3–4,5 %. Углерод в чугунах может быть в виде цементита, графита или их смеси (в зависимости от скорости охлаждения при кристаллизации).

Кремний повышает механические свойства чугуна при концентрации не более 3,0–3,5 %. При более высокой концентрации кремния включения графита становятся грубыми, пластичность чугуна снижается.

Марганец увеличивает растворимость углерода в чугуне, при содержании более 0,5 % он повышает склонность чугуна к отбеливанию.

Увеличение содержания марганца повышает усадку, что способствует образованию трещин и внутренних напряжений. Основное назначение марганца в чугуне – нейтрализация вредного влияния серы.

Сера – нежелательная примесь в чугуне, ее влияние определяется формированием по границам зерен хрупкой тройной эвтектики. При повышении содержания серы жидкотекучесть чугуна ухудшается, усадка и склонность к образованию трещин повышается.

Фосфор не оказывает существенного влияния на процесс образования графитных включений. Фосфор сильнее других элементов повышает жидкотекучесть чугуна. Отрицательно влияет на механические свойства: способствует снижению ударной вязкости, повышает склонность к образованию холодных трещин.

4.9. Графитизация чугуна

Графитизация – процесс образования графитных включений – определяется, в основном, скоростью охлаждения железоуглеродистых сплавов. Характерной особенностью серых чугунов является наличие графитовых включений.

По составу и кристаллическому строению аустенит и цементит ближе друг к другу, чем аустенит и графит. Поэтому образование цементита из жидкости и из аустенита происходит кинетически легче. Если скорость охлаждения позволяет, то образуются смеси с цементитом, т. е. белый чугун.

Графит более термодинамически устойчивая (стабильная) фаза, чем цементит. Смесь с графитом (А + Гр) обладает меньшей свободной энергией, чем смесь с цементитом (А + Ц), термодинамические факторы способствуют образованию из жидкости и аустенита смесей с графитом. При относительно небольших скоростях охлаждения, когда кинетические условия позволяют, образуется серый чугун.

Изменение свободных энергий жидкости ($F_{ж}$) и смесей с цементитом ($F_{А+Ц}$) и графитом ($F_{А+Гр}$) в зависимости от температуры представлено на рисунке 4.3. Если жидкость-расплав переохлаждается ниже точки равновесия $Ж \leftarrow А + Ц$ (1147 °С), то образуется смесь с цементитом, т. к. кинетически это легче осуществить.

В интервале 1147–1153 °С образование аустенито-цементитной смеси принципиально невозможно, т. к. свободная энергия смеси

$F_{A+Ц}$ выше свободной энергии жидкости $F_{ж}$. Образуется аустенито-графитная смесь. Если расплав охлаждается медленно, то степень переохлаждения невелика и происходит образование смеси с графитом, т. е. серого чугуна.

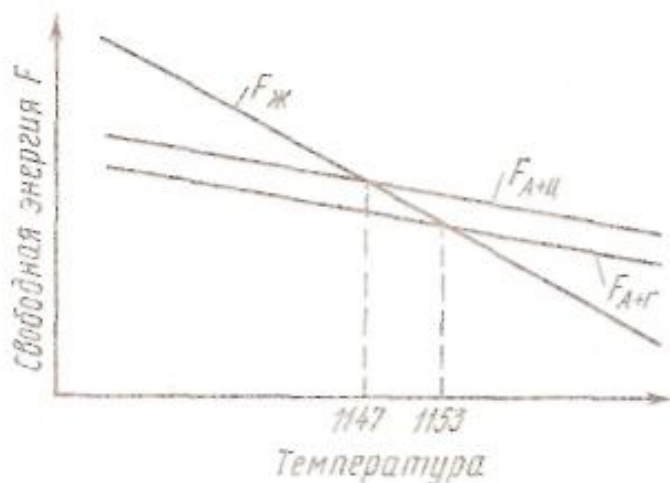


Рисунок 4.3. Изменение свободных энергий жидкого сплава и смесей с цементитом и графитом в зависимости от температуры

4.10. Получение и маркировка белых, серых, ковких и высокопрочных чугунов

Белые чугуны – это чугуны, в которых углерод находится в связанном состоянии, в виде цементита, их получают непосредственно из жидкого расплава при кристаллизации с большой скоростью охлаждения. Маркируются буквами БЧ без регламентирования механических свойств.

Серые чугуны (ГОСТ 1412–85) – чугуны, в которых углерод находится в свободном состоянии в виде графита.

Серый обычный чугун – один из наиболее распространенных литейных железоуглеродистых сплавов, имеющий пластинчатую форму графита. Он маркируется буквами СЧ и цифрами, указывающими предел прочности при растяжении в кгс/мм² или $\times 10$ МПа.

Высокопрочным называется чугун с шаровидной формой графита. Его получают введением в жидкий серый обычный чугун модификаторов (*Mg, Ce, Li* и др.) в количестве до 0,1 %. Высокопрочные чугуны маркируются буквами ВЧ и цифрами, указывающими предел прочности при растяжении (ГОСТ 7293–85).

Ковким называется чугун с хлопьевидным графитом, получаемый путем графитизирующего отжига белого чугуна продолжительностью 80–100 часов (рисунок 4.4). Маркировка ковкого чугуна производится буквами КЧ и двумя числами, из которых первое обозначает предел прочности при растяжении (в кгс/мм²), а второе – относительное удлинение (в %). Существуют следующие марки ковких чугунов: КЧ30-6, КЧ33-8, КЧ36-10, КЧ37-12 – ферритные; КЧ45-6, КЧ50-5, КЧ55-4 – перлитно-ферритные, КЧ60-3, КЧ65-3, КЧ70-2, КЧ80-1,5 – перлитные (ГОСТ 1215–79). Рекомендуемый химический состав КЧ отличается пониженным содержанием графитизирующих элементов углерода (2,4–2,9 %) и кремния (1,0–1,6 %).

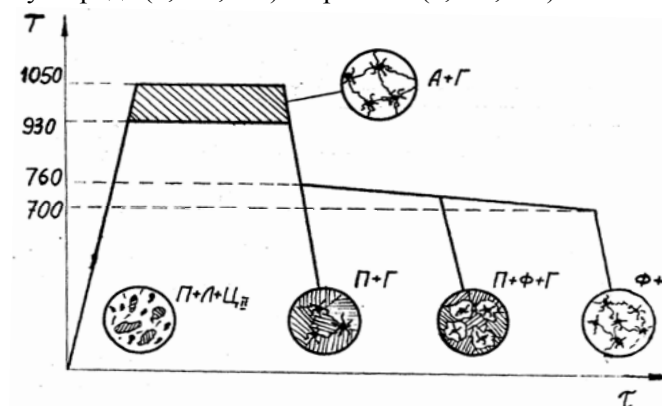


Рисунок 4.4. Режим отжига белого чугуна на ковкий чугун

4.11. Структура и свойства белых, серых, ковких, высокопрочных чугунов

Белый чугун имеет в изломе светлый и характерный металлический блеск. Белый чугун отличается высокой твердостью, хрупкостью, низкой прочностью и трудностью механической обработки.

По структуре белые чугуны подразделяются на доэвтектические (перлит + цементит + ледебурит), эвтектические (ледебурит), заэвтектические (цементит + ледебурит).

Структура металлической основы (матрицы) **серого чугуна** может быть феррит, феррит + перлит, перлит (в зависимости от содержания углерода и условий кристаллизации отливок).

Ферритный и феррито-перлитный чугуны СЧ10, СЧ15, СЧ20 имеют невысокие прочностные свойства (минимальное значение временного сопротивления 100–180 МПа) с толщиной стенки отливки 10–30 мм. Перлитные чугуны СЧ 25, СЧ 30, СЧ 35 вследствие более высоких значений прочности применяют для получения ответственных отливок блоков цилиндров двигателей, поршней, деталей, работающих на износ и т. п. с толщиной стенок до 60–100 мм.

Серый обычный чугун, из-за меньшей в сравнении со сталью температурой плавления и наличием в структуре графита, обладает лучшими литейными свойствами. Он имеет хорошую жидкотекучесть и малую усадку. Наличие графита делает его хрупким, так как графитные включения нарушают сплошность металлической основы. Чугун с перлитной основой более прочен и износоустойчив.

Механические свойства серых чугунов зависят от химического состава. Обычно содержат 3,0–3,7 % С и 1,2–2,6 % Si при условии $C + Si/3 = 4,3$ %. Прочностные свойства серого чугуна при испытании на сжатие значительно лучше, чем при испытании на растяжение и изгиб. Это объясняется концентрацией напряжений возле пластинок графита.

Матрица **высокопрочного чугуна** может быть ферритной, ферритно-перлитной и перлитной. В последнее время они получают все большее применение, особенно взамен ковкого и серого чугунов. Рекомендуемый состав (2,7–3,7 % С, 0,5–3,8 % Si) выбирается в зависимости от толщины стенки отливок.

Ферритные чугуны ВЧ35 и ВЧ40 характеризуются умеренной прочностью и высокой пластичностью. Перлитно-ферритные чугуны ВЧ45 и ВЧ50 имеют более высокую прочность, но существенно меньшую пластичность. Требуемые свойства чугунов этих двух классов получают непосредственно в литом состоянии без термической обработки. Перлитные чугуны ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80 и ВЧ100 при значительно более высокой прочности, чем у перлитно-ферритных чугунов, имеют практически равную пластичность.

По уровню свойств ковкий чугун занимает промежуточное положение между серым чугуном и сталью. Матрица может быть также перлитная, ферритная и перлитно-ферритная. Он выгодно от-

личается от стали лучшими литейными свойствами, а от серого чугуна – более высокой вязкостью и пластичностью. Основные преимущества ковкого чугуна заключаются в однородности его свойств по сечению отливки, отсутствию напряжений в отливках и сочетании высоких механических свойств с хорошей обрабатываемостью резанием, недостатки – высокая энергоемкость и низкая производительность процесса отжига.

4.12. Применение белых, серых, ковких, высокопрочных чугунов

Белые чугуны отличаются высокой твердостью, хрупкостью, низкой прочностью и трудностью механической обработки. Отливки из белого чугуна применяются редко, а используются для получения деталей с последующим отжигом на ковкий чугун. В качестве конструкционного материала их используют для изготовления мелющих шаров, износостойкой наплавки рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Серый обычный чугун является основным конструкционным материалом для изготовления базовых отливок деталей (СЧ10, СЧ15 – малоответственные части сельскохозяйственных, текстильных, швейных машин, станочное литье, радиаторы; СЧ18, СЧ20 – ответственные части тракторов, автомобилей, станков, крупные шкивы и маховики; СЧ25, СЧ30 – отливки для дизелестроения, блоки автомобильных цилиндров, поршневые кольца; СЧ30, СЧ35 – дизельные цилиндры, коленчатые и кулачковые валы, штампы, тяжело нагруженные детали), работающих в условиях знакопеременных нагрузок и вибраций. Отливки из серого чугуна с пластинчатым графитом составляют до 80 % общего объема чугунного литья.

Высокопрочный чугун находит широкое применение в различных областях промышленности и сельского хозяйства (корпуса баббанов, поршни, статоры, крестовины, коленчатые валы, цилиндрические конические шестерни).

Ковкий чугун используется преимущественно для отливок с небольшой толщиной стенки 5–50 мм. Из КЧ изготавливают мелкие фасонные отливки, работающие в условиях динамических знакопеременных нагрузок: детали приводных механизмов, коробок, передач, коллекторы, рычаги, детали шасси в автотракторном и сельскохозяйственном машиностроении.

ГЛАВА 5

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

5.1. Сущность термической обработки

Под термической обработкой (ТО) понимают совокупность операций теплового воздействия на металлы и сплавы с целью изменения их структуры и свойств. Сущность ТО состоит в том, чтобы нагревом до определенной температуры, выдержке при этой температуре и последующим охлаждением получить необходимую структуру и требуемые свойства стали.

Основными факторами при термической обработке являются температура и время. Важнейшие параметры процессов ТО: температура нагрева $t_{\text{нагр}}$; время выдержки стали при температуре нагрева $\tau_{\text{выд}}$; скорость нагрева $V_{\text{нагр}}$; скорость охлаждения $V_{\text{охл}}$.

5.2. Образование аустенита при нагреве стали

Изменение структуры и свойств сталей ТО связано с фазовыми превращениями, а, следовательно, с метастабильной диаграммой «железо – цементит». Для многих видов термической обработки сталь нагревают до температур, соответствующих существованию аустенита. Область устойчивого существования аустенита на диаграмме $Fe-Fe_3C$ (рисунок 5.1) расположена выше линии $A_3(GS)$ и $A_1(PSK)$.

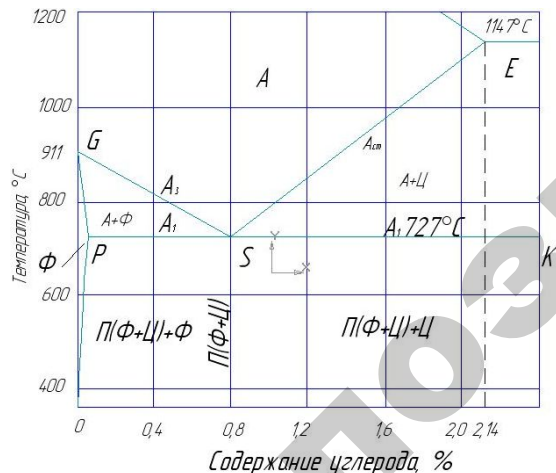


Рисунок 5.1. Нижний левый угол диаграммы состояния сплавов «железо – цементит»

Нагрев эвтектоидной стали (0,8 % C) например, марки У8, до температуры A_{C1} приводит к превращению перлита в аустенит $P \Rightarrow A$. Образование аустенита из перлита является процессом *диффузионным* и *кристаллизационным*. Он состоит из зарождения центров кристаллизации аустенита на границах раздела пластинок феррита и цементита и последующего роста зерен аустенита вокруг этих центров.

Образование аустенита из перлита происходит путем растворения цементита в феррите и аллотропического превращения феррита в аустенит. Образовавшийся аустенит неоднороден по содержанию углерода. Под влиянием перепада концентрации происходит диффузия атомов углерода в аустените. В объеме одного зерна перлита возникает множество центров кристаллизации, поэтому из одного зерна перлита образуется большое число зерен аустенита.

5.3. Действительная и наследственная величина зерна

Под *природной* или *наследственной зернистостью* понимают склонность зерна аустенита к росту.

Стали, у которых зерно аустенита при нагревании немного выше A_{C3} начинает сразу сильно расти, называют *природно-крупнозернистыми* или *наследственно-крупнозернистыми*. Стали, у которых не наблюдается заметного роста зерен при нагревании до температуры 950 °C, называются *природно-мелкозернистыми*, или *наследственно-мелкозернистыми*. При нагревании выше 950 °C во всех случаях наблюдается сильный рост зерен аустенита.

Действительное зерно – фактический размер зерна стали, выявляемый в изделии при микроструктурном исследовании.

5.4. Кинетика превращений переохлажденного аустенита

Кинетика превращения аустенита в феррито-цементитную смесь при охлаждении стали описывается при помощи *диаграммы изотермического превращения аустенита*, т. е. распада аустенита при постоянной температуре. Для фиксации превращений аустенита используется структурно-закалочный метод, позволяющий произвести оценку по микроструктуре, механическим или магнитным свойствам образцов.

Результаты исследования при постоянной температуре характеризует *кинетическая* кривая, показывающая количество распавшегося аустенита в зависимости от времени, прошедшего с момента начала распада. На рисунке 5.2, а видно, что распад аустенита на-

чинается спустя некоторое время после охлаждения его до выбранной температуры выдержки, которое называют **инкубационным периодом**. По истечении инкубационного периода (1 % образовавшегося перлита) начинается медленное развитие процесса превращения. В начале скорость его невелика, затем она быстро нарастает и достигает максимума, когда около 50 % аустенита распалось. В дальнейшем скорость превращения уменьшается и к концу превращения медленно затухает.

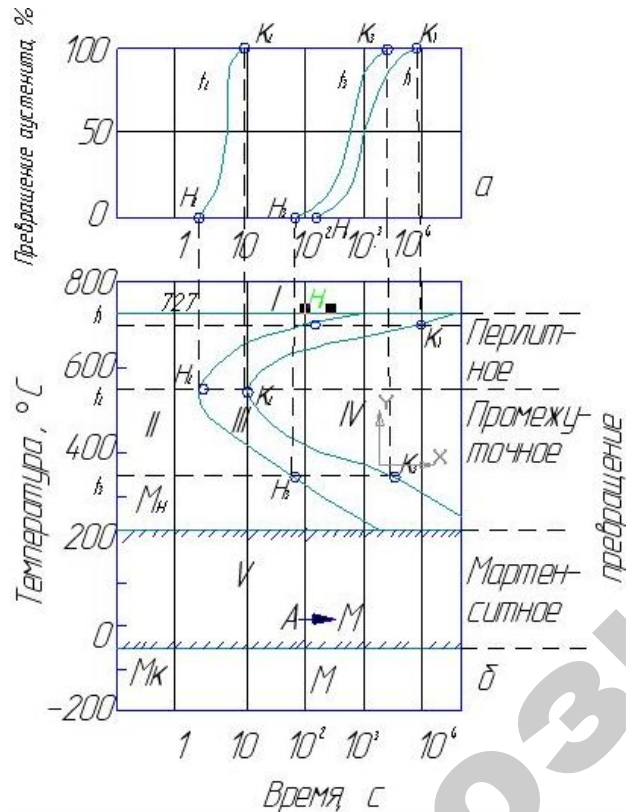
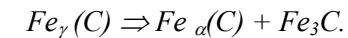


Рисунок 5.2. Построение диаграммы изотермического превращения переохлажденного аустенита для стали с 0,8 % углерода: *а* – кинетические кривые; *б* – диаграмма изотермического превращения аустенита; 1, 2 – кривые начала и окончания распада аустенита

Построение кинетических кривых после охлаждения при разных температурах (t_1, t_2, t_3) позволяет получить диаграмму изотермического превращения аустенита (рисунок 5.2, *б*). Отрезки времени, соответствующие началу (H_1, H_2, H_3) и концу распада аустенита (K_1, K_2, K_3) для каждой из исследуемых температур (t_1, t_2, t_3), переносят на график, на котором по оси абсцисс откладывают время в логарифмической шкале, а по оси ординат – температуру. Одноименные точки соединяют плавными кривыми.

5.5. Перлитное превращение

При переохлаждении аустенита происходит его превращение в перлит, которое заключается в распаде аустенита. Аустенит, практически однородный по концентрации углерода, распадается с образованием феррита (содержание углерода 0,02 %) и цементита (содержание углерода 6,67 %).



Перлитное превращение переохлажденного аустенита $A \Rightarrow П$ ($\Phi + Ц$) носит кристаллизационный характер и по своему механизму является диффузионным. Ведущей фазой при этом является цементит. Его зародыши, как правило, образуются на границах зерен аустенита.

В результате роста частиц этого карбида прилегающий к нему объем аустенита обедняется углеродом, снижает свою устойчивость и испытывает полиморфное $\gamma \Rightarrow \alpha$ -превращение. Кристаллики феррита зарождаются на границе с цементитом, что облегчает этот процесс.

Продукты перлитного превращения имеют **пластинчатое строение**. Чем больше переохлаждение, тем тоньше получающаяся феррито-цементитная структура. Пластинчатые структуры эвтектидного типа определяют как **перлит**, **сорбит** и **троостит** или, соответственно, грубо-, средне- и тонко дифференцированный перлит (рисунок 5.3).

Структуры перлита, сорбита и троостита закалки отличаются не только по своему строению, но и по механическим свойствам. С увеличением степени дисперсности феррито-цементитной смеси увеличиваются твердость, прочность и уменьшаются вязкость и пластичность стали (таблица 5.1).

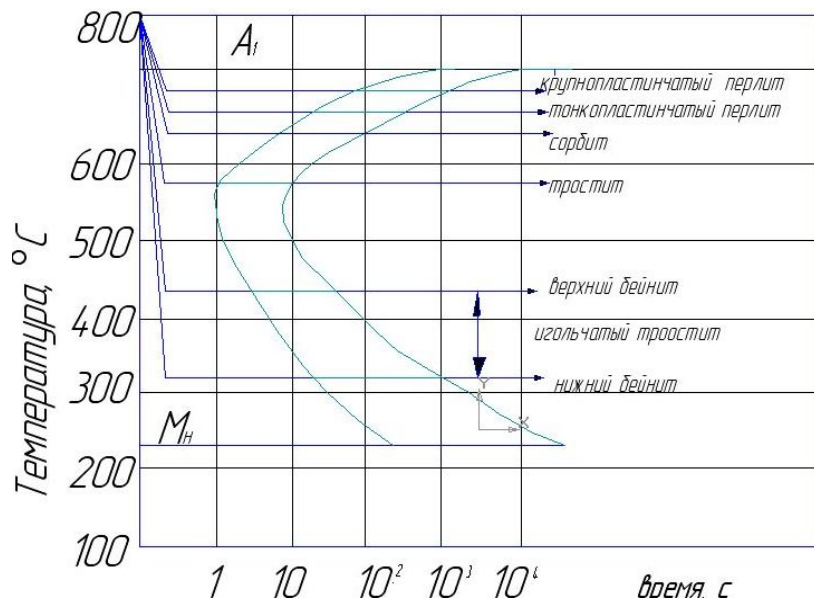


Рисунок 5.3. Структуры, образующиеся при различных степенях переохлаждения аустенита

Таблица 5.1 – Структура и свойства углеродистой стали

Структура	Перлит	Сорбит	Троостит
Размеры, мкм	0,6.....1,0	0,25....0,30	0,10....0,15
Твердость, НВ	180....250	250....350	350....450

5.6. Промежуточное превращение

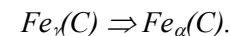
Промежуточное превращение идет при переохлаждении аустенита ниже 550 °С (ниже выступа С-образной кривой, рисунок 5.2, б). В этом случае аустенит также распадается на феррито-цементитную смесь, но она имеет игольчатое строение. При температурах превращения 250–450 °С диффузия углерода затруднена, а аустенит представляет собой упругую среду, хорошо сопротивляющуюся росту новых фаз. Поэтому распад аустенита идет за счет образования все новых и новых пластинок (игл) феррито-цементитной смеси. Оно протекает в интервале температур, когда отсутствует диффузия железа, но интенсивно протекает диффузия углерода.

Такое превращение называется **промежуточным** или **бейнитным**, а получаемая структура – игольчатым **трооститом** или **бейнитом** (рисунок 5.3). Чем больше переохлаждение, тем более дисперсной является смесь. Структуры промежуточного превращения подразделяют на **верхний** и **нижний** бейниты, которые отличаются по своим свойствам. Верхний бейнит образуется в районе температур переохлаждения порядка 450 °С, а нижний – 300–350 °С. Для эвтектоидной стали твердость верхнего бейнита составляет 45 HRC, а нижнего – 55 HRC.

Характерной особенностью бейнитных структур является наличие в ферритной основе мелких зернышек твердой фазы (цементита и мартенсита) с закругленными краями. Это придает им большую вязкость в сравнении со структурами сорбита и троостита.

5.7. Мартенситное превращение

Мартенситное превращение $A \Rightarrow M$ происходит при очень быстром непрерывном охлаждении сплава. При температуре ниже M_n (рисунок 5.2, б) начинается бездиффузионное превращение переохлажденного аустенита, которое заключается в аллотропическом превращении γ -железа в α -железо



Полученная в результате этого превращения особая структура называется **мартенситом**. Мартенсит является пересыщенным твердым раствором внедрения углерода в α -железо. В равновесном состоянии растворимость углерода в α -железе при комнатной температуре составляет 0,006 %. Его содержание в мартенсите может быть таким же, как и в исходном аустените, и может достигать 2,14 %. За счет избыточного растворения углерода в α -железе кристаллическая решетка искажается и превращается из кубической К8 в тетрагональную Т8 (рисунок 5.4).

Искажения кристаллической решетки твердого раствора ведут к увеличению твердости и снижению пластичности. Твердость мартенсита будет тем больше, чем больше растворено углерода в твердом α -растворе, который имеет максимальную твердость 60–62 HRC.

Превращение переохлажденного аустенита в мартенсит может протекать только при **непрерывном охлаждении**, тогда как перлитное превращение протекает как при непрерывном охлаждении, так и изотермическом.

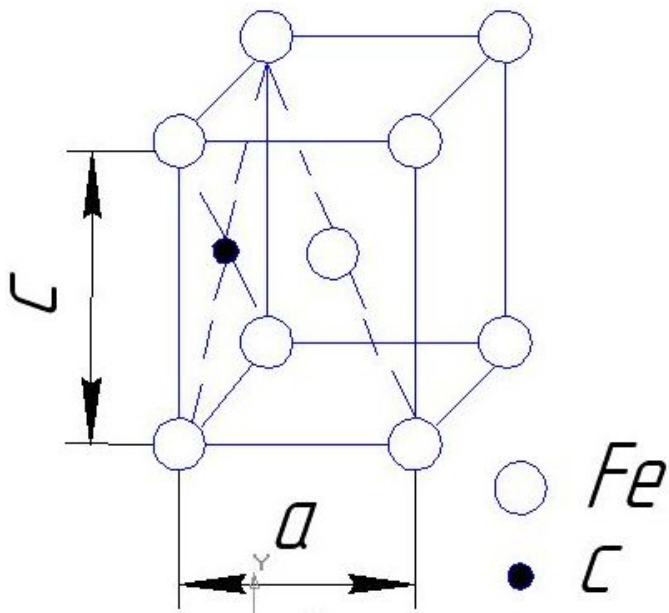


Рисунок 5.4. Кристаллическая решетка мартенсита

Преобразование аустенита в мартенсит никогда не идет до конца, даже при охлаждении ниже точки M_k ; в закаленной стали кроме мартенсита всегда есть небольшое количество остаточного аустенита ($A_{ост}$).

При превращении аустенита в мартенсит возникают большие внутренние напряжения, которые вызывают деформацию, а иногда и появление трещин в закаленных изделиях.

5.8. Диаграмма изотермического превращения аустенита и ее значение

Диаграмма изотермического превращения аустенита позволяет определить и получить необходимую структуру стали. Она применяется для практических назначений режимов термической обработки и прогнозирования свойств сталей.

В диаграмме изотермического превращения аустенита (рисунок 5.2, б) кривая 1 характеризует начало распада аустенита, а кривая 2 – окончание полного распада аустенита.

На диаграмме можно выделить следующие области:

I – область устойчивого аустенита; II – область переохлажденного аустенита; III – область превращающегося аустенита; IV – область продуктов превращения аустенита; V – область мартенситного превращения.

Область II определяет продолжительность инкубационного периода. Длительность инкубационного периода характеризует устойчивость переохлаждения аустенита. С увеличением переохлаждения его устойчивость быстро уменьшается, достигая минимума, и далее вновь возрастает.

При температуре наименьшей устойчивости аустенита – 550 °С скорость превращения очень велика. В углеродистых сталях длительность инкубационного периода при этой температуре не превышает 1,0...1,5 с.

Уменьшение устойчивости аустенита и роста скорости его превращения с увеличением степени переохлаждения объясняется возрастанием разности свободных энергий аустенита и образующимися фазами. Повышение устойчивости аустенита и уменьшение скорости его превращения при больших степенях переохлаждения вызывается снижением скорости образования и роста новых фаз вследствие замедления процесса диффузии.

5.9. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении

Преобразование аустенита при непрерывном охлаждении происходит ниже температуры A_1 в связи с тем, что свободная энергия продуктов распада становится ниже, чем свободная энергия аустенита.

С увеличением скорости охлаждения возрастает степень переохлаждения аустенита относительно равновесной точки A_1 . Чем больше скорость охлаждения и ниже температура распада аустенита (рисунки 5.3, 5.5), тем дисперснее образующаяся ферритно-цементитная структура, как и при изотермическом распаде аустенита. С небольшой скоростью охлаждения V_1 образуется перлит, при большей V_2 – сорбит, еще большей V_3 – троостит. При непрерывном охлаждении углеродистых сталей бейнит обычно не образуется. При высоких скоростях охлаждения (V_4) структура состоит из троостита и мартенсита.

При очень большой скорости охлаждения диффузионный распад аустенита становится невозможным. Тогда аустенит переохлаждается до точки M_k и превращается в мартенсит (рисунки 5.2 и 5.5).

В структуре обязательно присутствует остаточный аустенит. Минимальную скорость охлаждения (рисунок 5.5, $V_{кр}$), при которой весь аустенит переохлаждается до точки M_n и превращается в мартенсит, называют **критической скоростью заковки**. Превращение аустенита в мартенсит протекает с очень высокой скоростью. Время образования первых мартенситных кристаллов определяется 10^{-5} – 10^{-7} с (микросекунд).

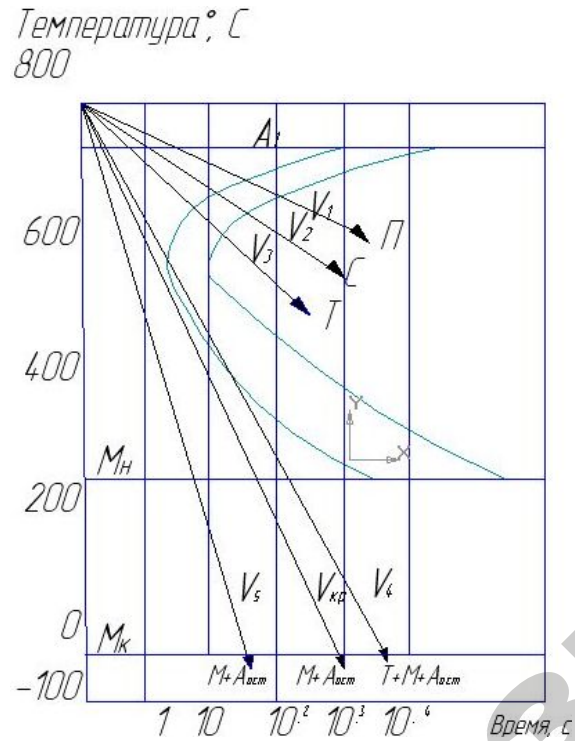


Рисунок 5.5. Наложение кривых охлаждения стали на диаграмму изотермического распада аустенита

5.10. Превращения при отпуске

Нагрев закаленной стали до температуры не более 150–200 °С приводит к равномерному распределению углерода в мартенсите и образованию мелкодисперсных карбидов (I превращение при отпуске).

Структуру, образующуюся в результате распада мартенсита при этих температурах, называют **отпущенным мартенситом**, который отличается от мартенсита закалки меньшей концентрацией в нем углерода и необособленными включениями дисперсных карбидов. Твердость при этом практически не изменяется.

При нагреве закаленной стали до 200–300 °С происходит распад **остаточного аустенита** на пересыщенное α -железо и карбиды. Хрупкость стали повышается (II превращение).

При нагреве до 350–450 °С полностью завершается процесс выделения углерода из пересыщенного α -раствора железа (мартенсита), происходит обособление решеток феррита и карбида. Образующуюся структуру называют **трооститом отпуска**. Твердость стали снижается (III превращение).

При нагреве закаленной стали до температуры 500–600 °С происходит коагуляция карбидов, образуется более крупная ферритоцементитная смесь, которая называется **сорбитом отпуска** (IV превращение).

ГЛАВА 6

ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

6.1. Классификация видов термообработки

В практике машиностроения различают *первичную* и *вторичную* термические обработки (ТО). Назначение первичной ТО заключается в подготовке структуры к последующим операциям механической, пластической или окончательной термической обработки. К ним относят все виды отжига, нормализацию. Назначение вторичной ТО – получение необходимой структуры, а, следовательно, и требуемых свойств стали. Это различные виды закалки, отпуска, химико-термической и термомеханической обработок.

6.2. Нагрев при термической обработке

Первым этапом любого вида ТО является нагрев стали. Выбор температуры нагрева стали тесно связан с диаграммой состояния «железо – цементит» (рисунок 6.1).

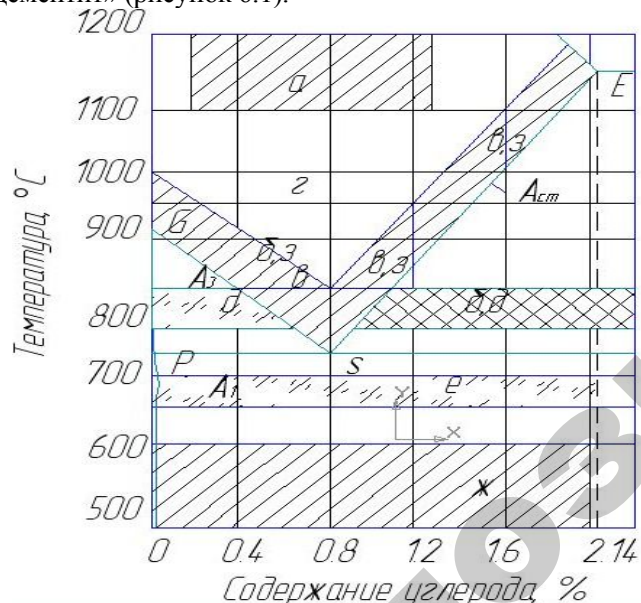


Рисунок 6.1. Температура нагрева для различных видов термической обработки: а – диффузионный отжиг; б – закалка; в – нормализация для устранения цементитной сетки; г – цементация; д – неполный отжиг; е – рекристаллизационный отжиг; ж – низкий отжиг; з – полный отжиг

В большинстве случаев термическая обработка стали начинается с получения структуры аустенита при ее нагреве выше критических точек A_{c3} , A_{c1} , A_{cm} .

Нагрев может производиться с различной скоростью в печах с газовой атмосферой (электрических, газовых, мазутных), в жидких средах (расплавленных металлах и солях), а также токами высокой частоты.

Нагрев в жидких средах обеспечивает большую скорость нагрева по сравнению с нагревом в печах с газовой средой. Индукционный нагрев, нагрев лазерным лучом позволяют получить еще большие скорости. Температура нагрева и время выдержки должны обеспечить получение мелкого действительного зерна

Общая продолжительность нагрева определяется опытным путем или по эмпирическим формулам. Продолжительность изотермической выдержки при заданной температуре составляет 15–25 % от времени прогрева.

6.3. Защитные атмосферы

В процессе нагрева и выдержки в печах с газовой атмосферой происходит окисление и обезуглероживание поверхностных слоев стали. Для получения в печи защитной атмосферы необходимо иметь определенное соотношение науглероживающих, окисляющих, обезуглероживающих и восстанавливающих газов: CO_2/CO ; H_2O/H_2 ; CH_4/H_2 . Нейтральной средой является чистый азот, а также вакуум. Нагрев в расплавленных солях осуществляется без окисления.

6.4. Отжиг стали, виды и применение

Отжиг является первичной ТО, цель которого либо устранить дефекты предыдущих операций горячей или холодной обработки, либо подготовить структуру к последующим технологическим процессам.

Отжиг – операция термической обработки, при которой сталь нагревается выше A_{c3} или только выше A_{c1} с длительной выдержкой при этих температурах с последующим медленным охлаждением (рисунок 6.2, ж).

Отжиги I рода (без фазовой перекристаллизации). **Диффузионный** или **гомогенизирующий отжиг** применяется для устранения ликвации, т. е. неоднородности химического состава внутри отдельных зерен или в объеме сплава, возникающей в процессе кри-

сталлизации в слитках и отливках. Он состоит из нагрева стали до температур (рисунок 6.1, а), значительно превышающих критические (1050–1200 °С) и обеспечивающих диффузию неравномерно распределенных элементов, а также длительной выдержки (10–100 ч) и медленного охлаждения (с выключенной печью).

Рекристаллизационный отжиг предназначен для снятия наклепа, заключается в нагреве деформированного материала до температуры выше температуры рекристаллизации, выдержке и последующем медленном охлаждении (в печи). Минимальная температура рекристаллизации железа и других металлов технической чистоты определяется по формуле $T_{рекp} = 0,3-0,4 T_{пл}$. На практике температура отжига выбирается выше расчетной на 200–300 °С. Для железа и низкоуглеродистой стали температура рекристаллизационного отжига принимается 650–700 °С (рисунок 6.1, е).

Низкий отжиг применяется для снятия напряжений, возникших в результате неравномерного охлаждения отливок, сварочных работ и обработки резанием (рисунок 6.1, ж). Температура низкого отжига находится в пределах 350–600 °С. Выдержка при температуре нагрева определяется размерами изделия, охлаждение производится в печи.

Отжиги II рода (с фазовой перекристаллизацией). **Полный отжиг** (рисунок 6.1, з). Сталь нагревают до температуры на 30–50 °С превышающей A_{C3} , выдерживают при этой температуре, медленно охлаждают до 500–600 °С вместе с печью, а затем на воздухе. Полный отжиг обеспечивает полную фазовую перекристаллизацию и применяется обычно для доэвтектоидных сталей.

Неполный отжиг. Сталь нагревают на 30–50 °С выше A_{C1} , но не превышают A_{C3} и A_{Cm} . Неполный отжиг с частичной перекристаллизацией проводят обычно для заэвтектоидных сталей и называют **сфероидизацией**, т. е. получают сталь со структурой **зернистого перлита**.

Изотермический отжиг. Сталь нагревают до температуры, превышающей A_{C3} на 30–50 °С, переносят в другую печь с заданной температурой (ниже A_{C1}) и проводят изотермическую выдержку до полного распада аустенита (рисунок 6.2, д).

Преимущество изотермического отжига состоит в уменьшении длительности процесса, особенно для легированных сталей. Его используют для заготовок и деталей небольших размеров.

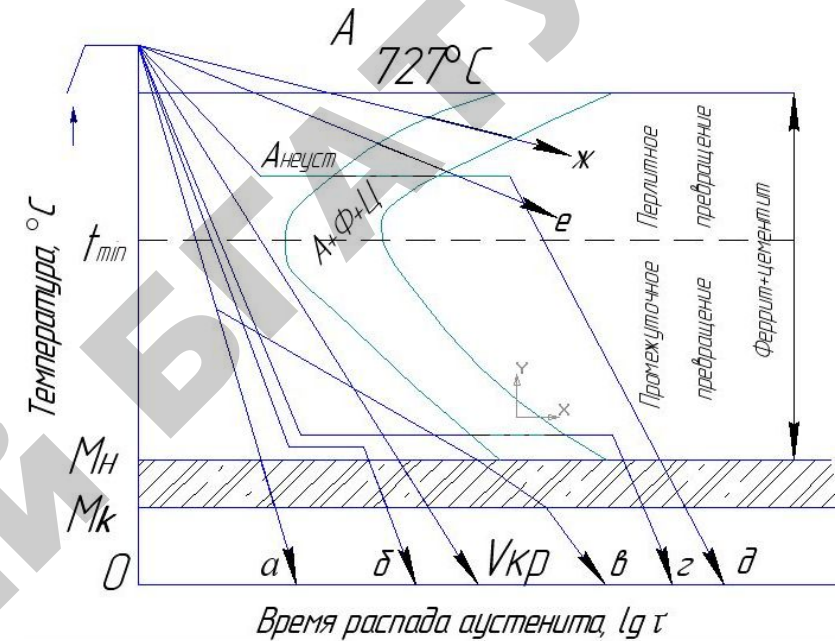


Рисунок 6.2. Кривые охлаждения для различных видов термической обработки, нанесенные на диаграмму изотермического распада аустенита: а – закалка в одном охладителе; б – ступенчатая закалка; в – закалка в двух средах; г – изотермическая закалка; д – изотермический отжиг; е – нормализация; ж – отжиг

6.5. Нормализация

Нормализация (нормализационный отжиг) – это нагрев доэвтектоидной стали до температуры на 30–50 °С превышающей A_{C3} , заэвтектоидной – на 30–50 °С превышающей A_{C1} , изотермическая выдержка и охлаждение на спокойном воздухе (скорость охлаждения при температурах 800–850 °С ~ 30 °/с) (рисунок 6.2, е).

После нормализации прочность и твердость стали выше, чем при отжиге. Разница в механических свойствах тем больше, чем выше содержание углерода в стали.

Нормализация малоуглеродистых сталей заменяет полный отжиг стали, что значительно сокращает длительность процесса ТО. В заэвтектоидных сталях нормализация предназначена для устранения цементитной сетки.

6.6. Закалка стали, ее виды и применение

Закалка – операция термической обработки, при которой доэвтектоидные стали нагревают на 30–50 °С выше A_{C3} , заэвтектоидные стали – выше A_{C1} , выдерживают при этой температуре для завершения фазовых превращений и затем охлаждают со скоростью выше критической (рисунок 6.2, а). Целью закалки является получение **предельной твердости** стали.

Выбор температуры нагрева стали перед закалкой объясняется необходимостью иметь **аустенитную** структуру (рисунок 6.1). Закалку сталей с содержанием углерода менее 0,3 % не производят, т. к. получается **мартенситная структура закалки** с низкой степенью тетрагональности решетки перенасыщенного твердого раствора углерода в α -железе, которая не обеспечивает высокой твердости и прочности стали. Нагрев заэвтектоидной стали ниже A_{C3} , объясняется желанием сохранить в структуре стали перед закалкой некоторое количество цементита, который препятствует росту зерна при нагреве и дополнительно повышает твердость закаленной стали. Для доэвтектоидных сталей дается **полная закалка**, а для заэвтектоидной – **неполная**.

Виды закалок. Закалка непрерывная (в одном охладителе) (рисунок 6.2, а). Деталь нагревают до температуры закалки, затем быстро охлаждают со скоростью выше критической в одной среде (вода, масло и др.). Недостаток способа заключается в том, что вследствие неравномерного охлаждения по сечению в детали возникают большие термические напряжения. Применяется для закалки деталей простой формы и не крупного сечения.

Прерывистая закалка (в двух средах) (рисунок 6.2, в). Нагретые для закалки изделия охлаждают со скоростью выше критической (обычно в воде) до температуры несколько выше M_n . Затем изделие переносят в менее интенсивный охладитель (масло или воздух). При таком методе превращение аустенита в мартенсит протекает в условиях замедленного охлаждения, с частичным перераспределением структурных напряжений. Он применяется для заэвтектоидных углеродистых сталей и требует высокой квалификации термиста.

Ступенчатая закалка (рисунок 6.2, б). Нагретое для закалки изделие охлаждают со скоростью больше критической в среде, имеющей температуру несколько выше M_n (обычно 180–250 °С), выдерживают в ней сравнительно короткое время (до начала превращения аустенита в феррито-цементитную смесь). После изотермической выдержки изделие охлаждают в масле или на воздухе до

комнатных температур. Выдержка обеспечивает выравнивание температуры по всему сечению изделия. Способ обеспечивает закалку с минимальным внутренним напряжением и применяется для деталей сложной конфигурации. Недостатком является невозможность его использования для закалки деталей крупных сечений, а так же потребность в дополнительном оборудовании.

Изотермическая закалка (рисунок 6.2, з) производится так же, однако продолжительность изотермической выдержки должна обеспечить распад аустенита в феррито-цементитную смесь – игольчатый троостит. Можно получать различные структуры распада переохлажденного аустенита в зависимости от температуры изотермической выдержки. Изделия после изотермической закалки имеют твердость меньшую, чем изделия с мартенситной структурой, однако комплекс их механических свойств (прочность, пластичность, ударная вязкость) является оптимальным для углеродистых и легированных сталей. Внутренние напряжения и деформация при такой закалке минимальные.

Закалка с самоотпуском. Изделие погружают в закалочную среду, но выдерживают в ней непродолжительное время. Затем извлекают и охлаждают на воздухе. Наружные слои изделия претерпевают мартенситное превращение, а температура изделия по сечению выравнивается. При этом наружные слои за счет тепла внутренних слоев нагреваются до температур отпуска. Применяется для деталей, которые должны сочетать высокую твердость на рабочей части с вязкой и прочной основой (зубила, молотки, лемеха и т. д.). Этот способ также эффективно используется при поверхностной закалке с использованием нагрева токами высокой частоты.

6.7. Выбор охлаждающих средств при термообработке

Охлаждающая среда должна обеспечить скорость охлаждения выше критической в интервале температур A_1 – M_n для подавления распада переохлажденного аустенита в области перлитного и промежуточного превращений и замедленное охлаждение в интервале температур мартенситного превращения M_n – M_k с целью уменьшения остаточных напряжений (рисунок 5.5). Слишком медленное охлаждение стали в интервале температур M_n – M_k может привести к частичному отпуску и увеличению количества остаточного аустенита, что снижает твердость стали.

Для закалки обычно используют кипящие жидкости: воду, водные растворы солей и щелочей, масла. Наиболее часто для доэвтектоидных и эвтектоидных углеродистых сталей в качестве охлаждающей среды употребляется вода. Ее положительным свойством является быстрое охлаждение стали в области наименьшей устойчивости аустенита (650–550 °С). Основными недостатками воды являются большая скорость охлаждения в районе мартенситного превращения (300–200 °С), резкое снижение закалывающей способности с повышением температуры воды.

Закалывающая способность воды может быть усилена путем растворения в ней солей, кислот, щелочей или замедлена путем подогрева или добавки мыла.

Масло как охлаждающая среда применяется при закалке легированных сталей, критическая скорость закалки которых значительно ниже, чем у углеродистых сталей. Масло в районе наименьшей устойчивости аустенита охлаждается примерно в 5–7 раз медленнее, чем вода, а в районе мартенситных превращений – в 10–15 раз медленнее, чем вода. Закалывающая способность масла слабо меняется с повышением его температуры. К недостаткам масла как закалочной среды относятся: огнеопасность, постепенное загустение масла (снижает закалывающую способность), пригорание масла на деталях.

6.8. Прокаливаемость стали

Прокаливаемость – способность стали закаливаться на определенную глубину слоя с образованием мартенситной или трооститомартенситной структуры с высокой твердостью. Прокаливаемость определяется критической скоростью охлаждения стали. Она тем выше, чем меньше критическая скорость закалки, т. е. чем выше устойчивость переохлажденного аустенита. Легированные стали, вследствие высокой устойчивости переохлажденного аустенита, прокаливаются на большую глубину, чем углеродистые.

За глубину прокаленного слоя принимают расстояние от поверхности до полумартенситной зоны (50 % мартенсита + 50 % троостита). Диаметр заготовки, в которой полумартенситная структура образуется в центре заготовки, называют **критическим**, т. е. детали такого диаметра прокаливаются насквозь.

6.9. Дефекты, возникающие при закалке

Недогрев возникает, если сталь была нагрета ниже критической температуры. В доэвтектоидной стали, нагретой до температуры немного ниже A_{c3} , часть феррита останется не превращенной в аустенит. После быстрого охлаждения аустенит превратится в мартенсит, а феррит сохранится в закаленной стали. Структура будет состоять из мартенсита и феррита. Феррит, имеющий низкую твердость, снижает общую твердость закаленной стали. Этот дефект можно исправить повышением температуры нагрева.

Перегрев возникает при нагреве стали намного выше критической температуры или если при нормальной температуре была дана очень большая выдержка. Перегрев при отжиге приводит к росту зерен с образованием при закалке крупногочечатого мартенсита. Механические свойства перегретой стали низкие. Исправить перегрев можно полным отжигом.

Пережог возникает, если сталь была нагрета близко к температуре начала плавления. Пережог характеризуется оплавлением и в связи с этим окислением металла по границам зерен. Сталь становится очень хрупкой. Дефект неустраним.

Окисление и обезуглероживание – процессы взаимодействия стали при нагреве с газами, содержащимися в печах (кислород, водород, углекислый газ). Окалина, образующаяся при окислении на поверхности деталей, кроме безвозвратной потери материала, приводит к их неравномерной твердости и вызывает необходимость дополнительной обработки. В результате обезуглероживания наружных слоев резко снижаются твердость на поверхности деталей и выносливость. Для предохранения от окисления проводят нагрев изделий в специальных печах с нейтральным по отношению к стали газовым составом.

Закалочные трещины возникают при слишком резком охлаждении и нагревании стали. Для устранения закалочных трещин используют равномерный нагрев и равномерное охлаждение детали; применяют закалки, которые обеспечивают медленное охлаждение в интервале мартенситного превращения (ступенчатая, изотермическая, закалка в двух средах).

Коробление возникает из-за неравномерного охлаждения отдельных частей детали. На коробление значительно влияют форма

детали и способ погружения детали в охлаждаемую среду. Для исключения коробления необходимо правильно выбирать режим закали (температура нагрева, скорость и способ охлаждения), применять закали в закалочных штампах.

Мягкие пятна образуются вследствие недогрева или недостаточно интенсивного охлаждения, иногда появляются из-за неоднородности исходной структуры. Дефект можно устранить проведением нормализации перед закалкой.

6.10. Отпуск стали, его виды и применение

Отпуск – операция термической обработки, при которой закаленная сталь нагревается до температур, лежащих ниже критической точки A_{C1} , выдерживается при данной температуре и охлаждается на воздухе. При отпуске происходит переход стали в более устойчивое состояние, которое сопровождается превращениями структуры.

Структурные превращения при отпуске связаны с процессами распада твердых растворов мартенсита и остаточного аустенита и образованием при нагреве до определенных температур мелкодисперсных зернистых структур – **троостита и сорбита**. В зависимости от требуемых свойств (рисунок 6.3) различают три вида отпуска.

Низкий отпуск – процесс, который включает нагрев закаленной стали до 150–200 °С, выдержку в течение 2,0–3,0 ч, охлаждение на воздухе. Структура – **мартенсит отпуска**. Цель – частичное снятие внутренних напряжений, повышение вязкости и пластичности стали без значительного снижения твердости. Этому виду отпуска подвергают детали и изделия, которым требуется высокая твердость и износоустойчивость (мерительный и режущий инструменты, детали после цементации и азотирования).

Средний отпуск включает нагрев закаленной стали до 300–500 °С, выдержку в течение 1,0–2,0 ч, охлаждение на воздухе. Структура – **троостит отпуска**. Цель – повышение упругих свойств стали при некотором снижении твердости, прочности и ударной вязкости. Применяют для деталей, упругие свойства которых имеют первостепенное значение (рессоры и пружины).

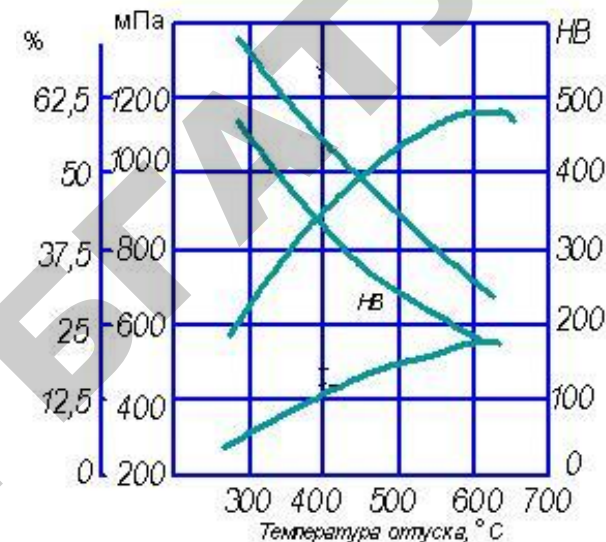


Рисунок 6.3. Механические свойства стали 40 в зависимости от температуры отпуска

Высокий отпуск включает нагрев закаленной стали до 500–650 °С, выдержку в течение 0,5–1,0 ч, охлаждение на воздухе. Структура – **сорбит отпуска**. Цель – снятие напряжений и получение наиболее оптимального сочетания прочности, пластичности, ударной вязкости. Сочетание закали и высокого отпуска в ТО называют **улучшением**. Улучшению подвергают стальные детали машин ответственного назначения, испытывающие в процессе эксплуатации статические, динамические и знакопеременные нагрузки, не требующие высокой твердости.

6.11. Термомеханическая обработка стали

Термомеханическая обработка (ТМО) заключается в сочетании пластической деформации стали в аустенитном состоянии в условиях закали наклепанного металла. Широко применяют следующие способы ТМО.

Высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО) включает деформацию стали при температуре устойчивого

аустенита, немедленную (во избежание развития процесса рекристаллизации) закалку после деформации, отпуск при температуре 150–300 °С (для снижения внутренних напряжений и повышения пластичности и вязкости стали).

Низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО) включает нагрев стали до температур устойчивого аустенита, выдержку, быстрое охлаждение до температур наименьшей устойчивости переохлажденного аустенита, пластическую деформацию в этом интервале температур, последующую немедленную закалку и отпуск при температуре 150–300 °С.

В настоящее время для некоторых сталей применяют ТМО с обратной последовательностью выполнения операций. Такая обработка называется **механико-термической обработкой** (МТО). Она включает операции в следующей последовательности: нагрев и выдержка стали при температурах устойчивого аустенита, закалка на мартенсит, малая пластическая деформация (3–5 %), низкий отпуск.

Термомеханическая обработка позволяет получить наиболее высокие механические свойства сталей. Наибольшее упрочнение – предел прочности, равный 2600–3000 МПа, достигается при НТМО.

6.12. Влияние термической обработки на структуру и свойства стали

В результате термической обработки наиболее существенно изменяются механические свойства стали.

В отожженном, нормализованном или отпущенном состоянии сталь состоит из пластичного феррита и включений карбидов (цементита). Феррит обладает низкой прочностью и высокой пластичностью, цементит же при нулевом значении удлинения и сужения имеет высокую твердость (около 800 НВ). Более высокое значение прочности и меньшая пластичность сплавов с содержанием углерода выше 0,1 %, объясняется упрочняющим действием карбидных включений.

После закалки высокая твердость мартенситной структуры объясняется тем, что элементарные кристаллические ячейки ее искажены, вследствие чего пластическая деформация затруднена и образование сдвигов в мартенсите почти невозможно. Чем больше углерода в стали, тем больше искаженность тетрагональной решетки мартенсита и больше его твердость. Твердость мартенсита зависит от содержания в стали углерода. Мартенсит в стали, содержа-

щей 0,1 % С, имеет твердость примерно 30 HRC. При 0,7 % С твердость мартенсита достигает максимального значения 64 HRC, и при дальнейшем увеличении содержания углерода она существенно не увеличивается. Если нагрев под закалку был произведен выше точки A_{C3} и весь углерод был переведен в твердый раствор, то твердость закаленной стали при увеличении содержания углерода выше 0,8 % снижается из-за возрастания количества остаточного аустенита.

6.13. Методы поверхностного упрочнения стали

Значительная доля деталей машин работает в условиях трения и выходит из строя в результате изменения геометрических размеров вследствие износа. Для таких деталей требуется высокая твердость и износостойкость поверхности (при сохранении вязкой и достаточно прочной сердцевины). Для придания стальным деталям таких свойств применяют поверхностную закалку, химико-термическую обработку, поверхностное упрочнение давлением и др. методы. Поверхностная закалка выгодно отличается значительно меньшей продолжительностью процесса.

6.14. Методы поверхностной закалки сталей

Сущность поверхностной закалки состоит в том, что поверхностные слои детали быстро нагреваются выше температур **критических** точек и по сечению создается резкий перепад температур (рис. 6.4). При дальнейшем охлаждении со скоростью выше **критической**, слой металла, нагретый выше A_{C3} (I) получит **полную закалку**; слой, нагретый выше A_{C3} , но ниже A_{C1} (II), – **неполную закалку**; сердцевина, нагретая до температур ниже A_{C1} (III), закалки не получит.

Нагрев поверхностных слоев при любом методе (токами высокой частоты, в расплавленных металлах или солях, пламенем горелки или лазером) осуществляется очень быстро и не приводит к росту зерна аустенита. Температура нагрева стали для поверхностной закалки назначается в соответствии с диаграммой состояния железоуглеродистых сплавов и берется на 30–50 °С выше, чем при обычной закалке. Поверхностной закалке, как и объемной, подвергают стали с содержанием углерода не ниже 0,3 %. Химический состав изделия по сечению не изменяется, меняется только структура. Чаще всего используются стали с содержанием углерода 0,4–0,45 %.

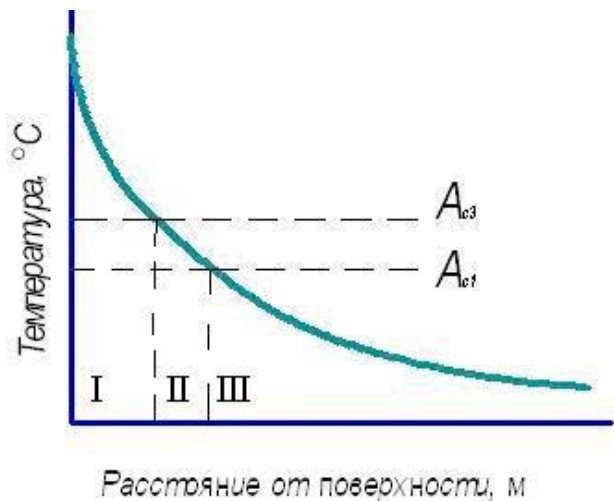


Рисунок 6.4. Распределение температур по глубине при поверхностной закалке

Закалочной средой после нагрева могут быть вода, водные растворы солей и щелочей. Охлаждение может быть струйчатым или с полным погружением в закалочную среду.

6.15. Поверхностная закалка стали с индукционным нагревом

Индукционный нагрев происходит вследствие теплового действия тока, индуцируемого в изделии, помещенном в переменное магнитное поле. В результате индукции в поверхностном слое возникают вихревые токи, а в обрабатываемом изделии происходит выделение тепла. Распределение переменного тока по сечению нагреваемого металла неравномерно. Глубина проникновения тока δ определяется по формуле и практически определяется частотой тока ω :

$$\delta = 50,3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \omega}},$$

где δ – глубина проникновения тока, м; ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м; μ – магнитная проницаемость, Гн/м; ω – частота тока, Гц.

Выбор оптимальной толщины закаливаемого слоя (0,5–10,0 мм) определяется условиями работы детали. Чаще всего применяют для закалки частоту тока 40–60 КГц. На основании производственного опыта установлено, что площадь сечения закаленного слоя должна быть не более 20 % всего сечения. После закалки с индукционным нагревом изделия подвергают низкому отпуску при 160–200 °С, зачастую используют самоотпуск.

Поверхностная закалка с индукционным нагревом эффективна для серийного и массового производства деталей простой конфигурации. Она находит широкое применение для изготовления деталей типа валов, осей, коленчатых валов, распределительных валиков, шестерен автомобилей, тракторов и других сельскохозяйственных машин.

6.16. Поверхностная закалка с газопламенным нагревом

Способ закалки применяют для крупных изделий сложной формы, которые трудно или невозможно подвергать индукционному нагреву, и для производства единичных изделий. Поверхность детали нагревают пламенем смеси горючих газов (ацетилен, пропан-бутан, природный газ, пары керосина) с кислородом. Для нагрева используют щелевые или многопламенные горелки.

Толщина закаленного слоя составляет 2–4 мм, его твердость – 50–56 HRC. В тонком поверхностном слое образуется мартенсит, а в глубинных слоях – троостит-мартенсит. По сравнению с объемной закалкой поверхностная пламенная закалка вызывает меньшие деформации и окисление поверхности.

6.17. Лазерная закалка

Осуществляется в результате кратковременного (от десятых до миллионных долей секунды) нагрева изделия концентрированным потоком энергии лазерного пучка и быстрого охлаждения. Глубина термически обработанного поверхностного слоя регулируется плотностью мощности лазерного пучка и временем его взаимодействия с изделием и может измеряться от 0,1–0,2 мм до 1–2 мм.

Преимущества метода лазерной термической обработки перед традиционно используемыми методами заключаются в высокой производительности, возможности автоматизации процесса, обеспечении обработки строго определенных участков и контуров деталей сложной формы.

6.18. Основы химико-термической обработки.

Химико-термическая обработка (ХТО) сочетает термическое и химическое воздействия с целью изменения химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя стали. ХТО осуществляется в результате диффузионного насыщения сплава неметаллами (углерод, азот, бор), или металлами (алюминий, хром, цинк и др.) в активной насыщающей среде.

ХТО возможна при осуществлении следующих процессов:

1) **диссоциации** – образования насыщающего элемента диффундирующего вещества в атомарном состоянии, например, углерода по реакции



2) **абсорбции** – поглощения поверхностью стали свободных атомов диффундирующего вещества. Это возможно, если насыщающий элемент и основной металл образуют между собой твердые растворы или химические соединения;

3) **диффузии** – перемещения атомов насыщающего элемента вглубь стального изделия.

При протекании процессов ХТО в большинстве случаев скорость процесса определяется диффузией. Все факторы, ускоряющие процесс диффузии (повышение температуры и градиента концентрации, структурные дефекты и т. д.), сокращают длительность технологического процесса ХТО. Глубина диффузионного слоя зависит от температуры и продолжительности насыщения, а также от концентрации диффундирующего элемента на поверхности.

6.19. Цементация стали

Цементацией (науглероживанием) стали называется ХТО, которая заключается в диффузионном насыщении поверхностного слоя низкоуглеродистой стали углеродом при нагревании до 900–950 °С в углеродосодержащей среде. Назначение цементации и последующей термической обработки – придание поверхностному слою высокой твердости и износостойкости, повышение предела выносливости при сохранении вязкой сердцевины. Цементация осуществляется в твердой, газообразной, жидкой углеродосодержащих средах – карбюризаторах.

Цементация в твердом карбюризаторе. Насыщающей средой является твердый карбюризатор (дубовый или березовый уголь,

каменноугольный полукокс, торфяной кокс). Для ускорения процесса к карбюризатору добавляют активизаторы: углекислый барий и кальцинированную соду. Продолжительность цементации устанавливают из расчета 0,10–0,12 мм/ч.

Газовая цементация. Насыщающей средой является природный газ или пропан-бутановая смесь. Газовую цементацию обычно осуществляют при 930–950 °С в шахтных печах или печах непрерывного действия. Скорость газовой цементации – 0,2 мм/ч.

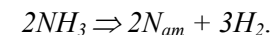
После цементации для достижения высокой твердости, износостойкости поверхности назначают закалку с последующим низким отпуском.

6.20. Азотирование стали

Азотированием называется процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали азотом при нагревании в соответствующей среде. Азотирование повышает твердость поверхностного слоя, его износостойкость, предел выносливости и сопротивление коррозии. Твердость азотированного слоя значительно выше, чем после цементации, сохраняется при нагреве до 600–650 °С. Твердость цементованного слоя сохраняется только до 200–250 °С.

Азотированный слой приобретает высокую твердость без какой-либо последующей термической обработки. Азотированию подвергают готовые изделия, прошедшие окончательную термическую обработку и шлифование. Перед азотированием стали подвергают улучшению.

Азотирование в газовых средах. Азотирование в газовых средах осуществляют в атмосфере аммиака NH_3 , который при нагревании до 500–520 °С диссоциирует на 15–25 %, а при нагреве до 600–650 °С – на 40–50 % по следующей реакции:



Образующийся атомарный азот диффундирует в сталь с образованием вначале α -фазы, а затем начинает образовываться следующая γ -фаза, стабильная при данной температуре.

Азотирование широко используют для упрочнения таких изделий, как гильзы цилиндров и клапаны изделий, коленчатые валы дизелей, валы, планки, трубчатые изделия в станкостроении, зубчатые колеса в станкостроении, детали турбин.

6.21. Цианирование и нитроцементация стали

Цианирование и **нитроцементацией** называют процессы совместного насыщения поверхности стали углеродом и азотом. Применение данных процессов повышает твердость и износостойкость стальных изделий.

Цианирование осуществляется при погружении изделий в нагретые до 820–860 °С расплавленные цианистые соли. Продолжительность процесса определяется получением требуемой толщины упрочненного слоя деталей и составляет 0,5–1,5 ч. Содержание углерода в поверхностном слое составляет 0,6–0,7 %, содержание азота в цианированном слое – 0,8–1,2 %.

После цианирования изделия подвергают закалке (непосредственно из ванны) и низкому отпуску при температуре 180–200 °С.

Для получения упрочненного слоя большой толщины (0,5–2,0 мм) применяют **глубокое цианирование** при температуре 930–960 °С в ванне, содержащей $NaCN$, $BaCl_2$ и $NaCl$. Время выдержки составляет 1,5–6,0 ч. Содержание элементов в упрочненном слое следующее: 0,8–1,2 % углерода, 0,2–0,3 % азота.

Недостаток цианирования – токсичность и высокая стоимость цианистых солей.

Нитроцементацию осуществляют в течение 2–10 ч при температуре 850–860 °С в газовых средах, содержащих науглероживающий газ и аммиак ($CH_4 + 30 \% NH_3$). Глубина упрочненного слоя составляет 0,2–0,8 мм.

После нитроцементации изделия подвергают закалке либо непосредственно из печи, с подстуживанием до 800–825 °С, либо после повторного нагрева. После закалки проводят низкий отпуск при 160–180 °С.

Нитроцементации подвергают изделия из низкоуглеродистой стали сложной конфигурации, склонные к короблению. В связи с тем, что процесс протекает при температурах ~ на 100 °С ниже, чем при цементации, удается снизить брак, причиной которого являются температурные напряжения.

6.22. Диффузионная металлизация

Диффузионная металлизация – процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали различными металлами, например, процесс насыщения хромом – **хромирование**, алюминием – **алитирование**, кремнием – **силицирование**, цинком – **цинкование**.

Комбинированные процессы, заключающиеся в одновременном насыщении стали хромом и алюминием, хромом и вольфрамом, называют **хромоалитированием**, **хромовольфрамиранием** соответственно и т. п. Диффузионную металлизацию можно проводить в твердых, жидких и газовых средах.

При **твердой металлизации** насыщающими веществами являются ферросплавы ($FeCr$, $FeSi$, $FeAl$) – сплавы железа с высоким содержанием этих элементов, с добавлением хлористого аммония (NH_4Cl). В результате реакции образуются соединения хлора с металлами ($CrCl_3$, $SiCl_3$, $AlCl_3$), которые при контакте с металлической поверхностью диссоциируют с образованием свободных атомов.

Жидкую диффузионную металлизацию осуществляют погружением детали в расплавленный металл (например, алюминий).

Газовую диффузионную металлизацию проводят в газовых средах, являющихся хлоридами разных металлов ($CrCl_3$, $SiCl_3$, $AlCl_3$).

Диффузия хрома, алюминия и других металлов протекает значительно медленнее, чем углерода, азота, бора, потому что последние образуют с железом твердые растворы внедрения, а металлы – твердые растворы замещения. При одинаковых условиях (температура, давление) диффузионные слои при металлизации в 10, 100 раз тоньше, чем при ХТО неметаллами.

Малая скорость диффузии препятствует широкому распространению процессов диффузионной металлизации, т. к. процесс дорогостоящий, проводится при повышенных температурах (1000–1200 °С) и длительное время. Только особые свойства получаемых металлизированных слоев, возможность экономии легирующих элементов обусловили некоторое применение данных процессов (например, повышение жаростойкости, коррозионной стойкости изделий).

6.23. Марки сталей для различных видов химико-термической обработки

Для цементации применяют стали с содержанием углерода до 0,25 %:

стали 10, 15, 20, 25 – для изготовления деталей, от которых требуется высокая твердость поверхности и невысокая прочность сердцевины;

7.1. Инструментальные стали

Инструментальные стали – это углеродистые и легированные стали, предназначенные для изготовления режущего и измерительного инструментов, штампов холодного и горячего деформирования, а также ряда деталей точных механизмов (пружин, шестерен) различной формы и размеров.

В зависимости от условий эксплуатации рабочая часть инструментов может нагреваться до 500–700 °С у режущих инструментов, до 800 °С – у штампов. Чтобы инструменты не теряли при этом работоспособность, у них не должны меняться структура и свойства. Инструментальные стали должны обладать рядом специальных свойств: теплостойкостью, износостойкостью, прочностью, вязкостью, прокаливаемостью, шлифуемостью.

Теплостойкость или **красностойкость** – способность стали сохранять твердость при высоких температурах. Теплостойкость создается специальным легированием (*W, Mo, V, Cr* и др.) и термической обработкой. Инструментальные стали содержат не менее 0,6 % углерода и подвергаются закалке с низким отпуском для обеспечения твердости 60–65 HRC, предела прочности при изгибе 250–350 МПа.

Износостойкость – способность стали уменьшать скорость изнашивания инструмента, обеспечивающая длительное сохранение размеров и формы рабочей части. Износостойкость определяется твердостью и микроструктурой стали. Наиболее износостойка сталь, которая имеет структуру мартенсита с равномерно расположенными в нем карбидами *W, Mo, V, Cr* и др.

Для штампов, фрез и других инструментов характерно ударное нагружение. В этом случае важное значение приобретает **ударная вязкость** материала.

Твердость и вязкость инструментальных сталей зависят от содержания углерода. Чем больше содержание углерода, тем более высокая твердость стали. Стали повышенной вязкости содержат меньше углерода, термически обрабатываются на более низкую твердость.

стали 15X, 20X, 20XФ – для небольших деталей, работающих на износ в условиях трения, при средних удельных давлениях и скоростях;

стали 18ХГТ, 20ХГР, 25ХГТ – для изготовления ответственных деталей, работающих при больших скоростях и наличии ударных нагрузок;

стали 15ХГНТА, 15ХГН2Т, 19ХГН, 20ХГНМ – для ответственных деталей грузовых и легковых автомобилей, сельскохозяйственной техники;

стали 12ХНЗА, 12Х2Н4А, 20ХНЗА применяют для особо ответственных тяжело нагруженных деталей.

Для азотирования применяют среднеуглеродистые легированные стали 40X, 30ХМА, 38 ХНВА, 40ХФА, 38ХГМ, 30ХЗМФ1, которые используются для шестерен, коленчатых валов мощных двигателей, кулачков, втулок, деталей паровых турбин. Азотированию также подвергают штамповые и быстрорежущие стали, а также изделия из высокопрочного чугуна.

Для нитроцементации используют низколегированные стали 18ХГТ, 20ХГР, 25ХГТ (для изготовления ответственных деталей, работающих при больших скоростях, наличии ударных нагрузок и подверженных короблению).

7.2. Классификация инструментальных сталей

Классификация инструментальных сталей по свойствам предложена Ю. А. Геллером (рисунок 7.1).

Инструментальные стали делятся на две категории: 1) **пониженной прокаливаемости** (углеродистые – У8–У12 и низколегированные – Х05, 6ХФ, 7ХФ, 85ХФ); 2) **повышенной прокаливаемости** (легированные – Х, 6ХС, 9ХС, ХГ, ХГСВ, В1, В5).

Инструментальные стали **пониженной прокаливаемости** с небольшим содержанием легирующих элементов отличаются слабой прокаливаемостью, закаляются в воде, а инструменты из них, как правило, имеет незакаленную сердцевину (до 10–25 мм).

Инструментальные стали **повышенной прокаливаемости** имеют содержание легирующих элементов 1–3 %. Инструменты из них закаляются в масле и прокаливаются, как правило, насквозь до 80–100 мм. Меньшая скорость охлаждения при закалке уменьшает опасность образования трещин, деформации и коробления, что особенно важно для многих видов инструментов, имеющих сложную конфигурацию.

По **теплостойкости** стали классифицируются на **нетеплостойкие**, **полутеплостойкие** и **теплостойкие** стали. **Нетеплостойкие** стали, сохраняющие высокую твердость (60 HRC) при нагреве не выше 190–300 °С, используются для резания мягких материалов с небольшой скоростью резания, холодного деформирования, измерительного инструмента.

Полутеплостойкие стали, преимущественно штамповые, сохраняют высокую твердость до 300...500 °С. К ним относят высокохромистые и хромоникелевые эвтектоидные стали (до 12 % хрома). Такие стали характеризуются повышенной износостойкостью в условиях абразивного изнашивания, обусловленного высоким содержанием карбидов (*Cr*, *Fe*), например, Х6ВФ, Х12Ф1.

Теплостойкие стали, которые сохраняют свои эксплуатационные свойства до 550–700 °С, подразделяют на стали для резания с повышенной скоростью при нагреве рабочей части инструмента до 500–650 °С – **быстрорежущие** стали; стали для деформирования материалов при повышенном нагреве до 600–800 °С – **штамповые** стали повышенной вязкости.

Теплостойкие стали сохраняют высокую твердость: 60–62 HRC – у быстрорежущих; 45–52 HRC – у штамповых (в процессе эксплуатации при повышенной вязкости).

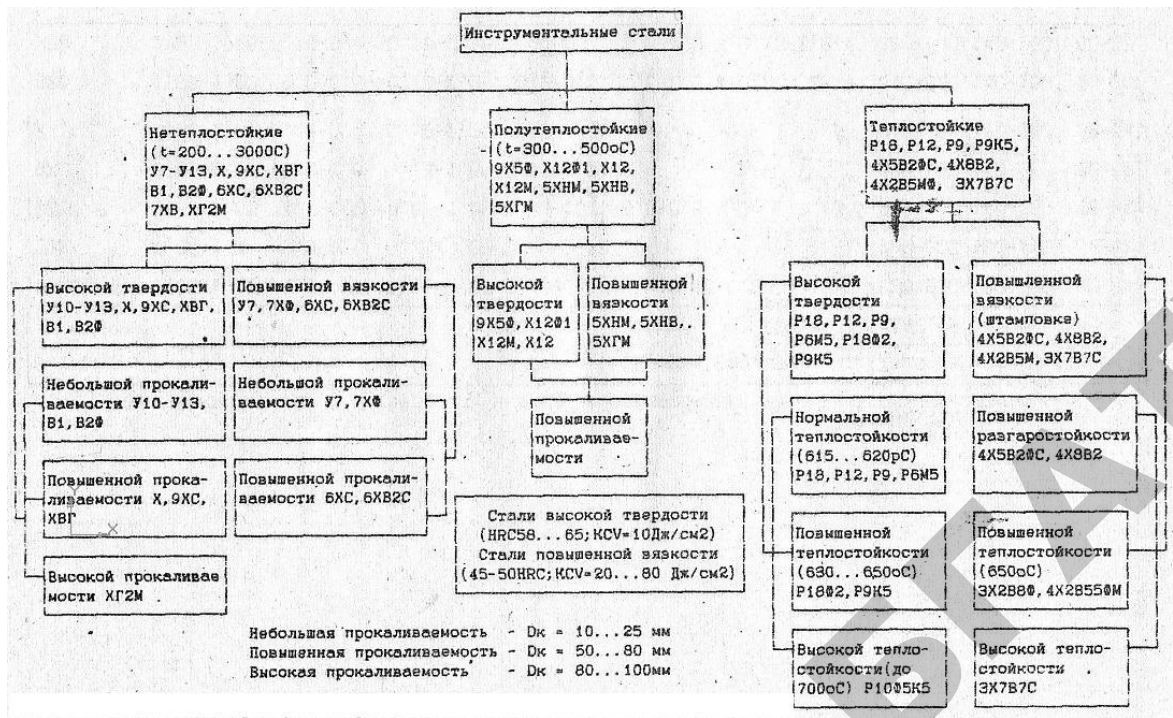


Рисунок 7.1. Схема классификации инструментальных сталей

7.3. Термическая обработка инструментальных сталей

Типовой режим термической обработки углеродистых инструментальных сталей: неполный отжиг – нагрев до температуры 760–780 °С, выдержка при этой температуре, охлаждение вместе с печью (в результате образуется структура зернистый перлит), затем проводят закалку – нагрев до температуры 760–780 °С, прерывистую или ступенчатую, структура после закалки мартенсит и $A_{ост}$. После закалки проводят низкий отпуск при температуре 200 °С.

Типовой режим термической обработки легированных инструментальных сталей: изотермический отжиг, после которого назначается закалка с нагревом в два этапа (медленный нагрев до температуры 400–500 °С, затем быстрый нагрев до температуры закалки) с последующим охлаждением в масле и низкий отпуск, температура 200 °С.

7.4. Применение инструментальных сталей

Примерное назначение инструментальных сталей приведено в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Назначение и марки инструментальных сталей

Инструменты, виды, условия эксплуатации	У8, У12	В1, В2	Х, Х9	9ХС	ХГ	ХВ5	Х12ФМ, Х12М1	5ХНС, 5ХНВ	4ХС, 4ХВС	7Х3	3Х2В8, 4Х5В2ФС
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Режущий по металлу. Легкие условия резания	+		+	+							
Режущий по металлу. Тяжелые условия резания											
Напильники	+		+								
Ножовки по металлу	+	+									
Мерительный инструмент	+		+		+		+				

Окончание таблицы 7.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Инструмент, не деформируемый при закалке			+	+	+		+				
Для алмазной расточки						+					
Молотовые штампы	+							+	+	+	+
Высадочные и чеканочные штампы	+								+		
Штампы холодной штамповки	+	+	+	+	+		+				
Волочильные доски											
Формы для литья под давлением	+								+		+

Хромованадиевые стали 7ХФ–11ХФ небольшой прокаливаемости применяются для изготовления деревообрабатывающих инструментов. Для измерительного инструмента широко применяют заэвтектонидные низколегированные стали Х, ХГ, ХВГ, 9ХС и др.

Стали с повышенной прокаливаемостью марок Х, 9ХС предназначены для изготовления массивного инструмента и сложной формы. При закалке в масле изделия из этих сталей не подвержены образованию трещин

Стали ХВГ и ХГ относят к малодеформирующимся. Их используют для изготовления метчиков, бритв, калибров, т. е. инструментов, сохраняющих размеры при термической обработке. Сталь ХВ5, называемая *алмазной*, обладает исключительно высокой твердостью (67–69 HRC) в силу наличия в мартенсите карбидов вольфрама.

Стали повышенной прокаливаемости 6ХС–9ХС, ХГСВ применяют для изготовления массивных штамповых инструментов сложных форм, шариков, колец и др. Сталь марки Х6ВФ используется для ножовочных полотен, резьбо- и зубонакатных инструментов, матриц и пуансонов холодного деформирования.

Стали Х12Ф1 (1,2–1,45 % углерода) и им подобные относятся к малодеформирующимся сталям *ледебуритного* класса, применяются для изготовления массивных инструментов (фрезы, протяжки, матрицы и пуансоны штампов холодной и горячей штамповки).

Хромоникелевые стали повышенной вязкости (5ХНМ, 5ХНВ, 5ХГМ, 5ХГВС и другие) используют для изготовления штампов (массой 5–70 т) горячего деформирования. Стали имеют $\sigma = 350\text{--}420$ МПа, $KC_v = 500\text{--}700$ Дж/м², $\delta = 40\text{--}80$ %. Они обладают высокой термостойкостью.

7.5. Быстрорежущие инструментальные стали, их маркировка и термическая обработка

Стали, используемые для изготовления инструментов, работающих при высоких скоростях резания, называются *быстрорежущими*. Инструменты из этих сталей (резцы, плашки, фрезы и т. п.) работают на скоростях, превышающих в 3–5 раз скорости работы инструментов из углеродистых сталей. Быстрорежущие стали относят к сталям ледебуритного класса с высокой теплостойкостью. В маркировке сталей за буквой «Р» следует число, указывающее среднее содержание вольфрама (в %), его условное обозначение опускается. Далее после букв М, К, Ф – содержание молибдена, кобальта и ванадия (если более 1,0...1,2 %). В их состав входят углерод – 0,8–1,25 %, хром ~ 4 %, ванадий – 1–2 %, содержание которых в марке не указывается.

Наиболее известной маркой является быстрорежущая сталь Р18 (0,7% С, 18% W, 4% Cr, 1% V). Сталь Р9 аналогична по своему значению и режущим свойствам, однако она труднее подвергается закалке, плохо шлифуется, но стоит дешевле.

В последнее время (в связи с дефицитом вольфрама и его высокой стоимостью) сталь Р18 заменяют вольфрамомолибденовыми сталями с пониженным содержанием вольфрама. Преимущественно используется сталь Р6М5 с несколько повышенным содержанием углерода (0,81–0,85 % вместо 0,7–0,8 % в Р18).

Высокая теплостойкость и высокие режущие свойства быстрорежущих сталей (Р18, Р12, Р9, Р6М5, Р14Ф4, Р9К10 и др.) создаются растворением вторичных карбидов и легированием твердого раствора, элементами, входящими в состав этих карбидов. Положительная роль избыточных первичных карбидов состоит в замедлении роста аустенитного зерна.

Термическая обработка инструмента из быстрорежущих сталей включает закалку и двух-трехкратный отпуск для получения структуры, состоящей из мелкоигольчатого мартенсита и карбидов. Температура закалки должна быть возможно выше, но не более температуры начала интенсивного роста зерна аустенита или оплавления (1220–1290 °С). Вследствие малой теплопроводности такой стали инструмент (во избежание трещин) нельзя сразу помещать в печь, а только после предварительного подогрева. Охлаждение при закалке осуществляют в масле или на воздухе для исключения выделения карбидов. Отпуск стали проводят по различным режимам (обычно при 560 °С) с целью постепенного перевода остаточного аустенита в мартенсит и получения твердости 64–68 HRC (например, рисунок 7.2). В ряде случаев применяется обработка холодом после третьего охлаждения до –80 °С и однократный отпуск.

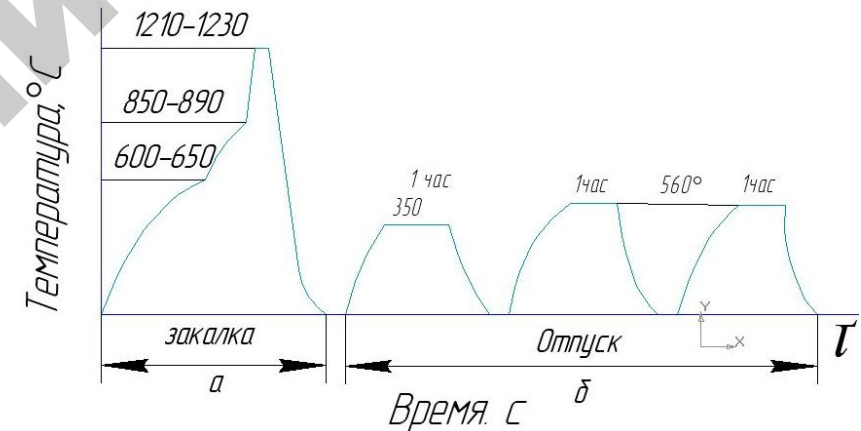


Рисунок 7.2. Схема термической обработки инструментов из быстрорежущих сталей (Р6М5)

7.6. Твердые сплавы, их маркировка, получение, состав и применение

Для скоростного резания металлов применяют инструмент, оснащенный *твердыми сплавами*, у которых рабочая температура может быть увеличена до 800–1000 °С (для быстрорежущей стали не больше 700 °С). Теплостойкость твердых сплавов различных марок ~ 800–900 °С, что позволяет повысить скорость резания в 2–10 раз.

Твердые сплавы представляют собой полученные методами порошковой металлургии спеченные сплавы из порошков карбидов вольфрама и титана (90–95 %) на металлическом связующем (кобальт), с очень высокой твердостью 88–92 HRA или 72–80 HRC. Изделия из твердых сплавов нельзя подвергать никакой механической обработке, кроме шлифования.

Режущий инструмент не изготавливают полностью из твердого сплава, а лишь его режущую часть; пластинку прикрепляют к державке из обычной стали. Твердые сплавы значительно превосходят быстрорежущие стали по твердости, но уступают им по прочности. Твердый сплав наряду с высокой твердостью обладает повышенной хрупкостью и малой прочностью на изгиб и растяжение.

В зависимости от структуры и состава карбидных фаз современные твердые сплавы подразделяют на три группы.

К первой группе относятся однокарбидные твердые сплавы (WC), состоящие из карбида вольфрама (группа ВК). Они подразделяются на марки (ВК3, ВК6, ВК8, ВК10), различающиеся содержанием кобальта (в сплаве ВК3 – 3 % кобальта, ВК6 – 6 % кобальта и т. д.). Чем больше кобальта в сплаве, тем он менее тверд и размягчается при более низкой температуре (до 800 °С), но менее хрупок.

Ко второй группе – группе ТК относят двухкарбидные сплавы (карбид титана + карбид вольфрама). Типичный представитель данной группы – сплав Т15К6. При спекании (вследствие процессов диффузии и растворения вольфрама и углерода в карбиде титана) их структура состоит более чем на 50 % из карбида титана. Они более теплостойки (до температуры 900–1000 °С).

К третьей группе – группе ТТК относятся трехкарбидные сплавы, состоящие из сложного карбида (WC) и карбида тантала TaC . Это сплавы ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ20К9. При таком количестве карбида титана в составе сплава в нем полностью растворен вольфрам. Структура сплава состоит из округлых зерен карбида (Ti , WC).

Карбид титана отличается от карбида вольфрама не только большей твердостью, но и повышенной хрупкостью. На основе титана разработаны новые твердые сплавы, не содержащие дорогого вольфрама. В них карбид вольфрама заменен карбидом или карбонитридом титана, а в качестве связки используются железо, молибден и другие металлы (ТМ1, ТМ3 (92 HRA)). Они отличаются высокой окалинотойкостью, малым коэффициентом трения.

Практика показала, что для обработки хрупких материалов (чугуна и др.) лучше применять сплавы группы ВК (1 группы), для обработки сталей – сплавы группы ТК (2 группы). Сплавы группы ТТК (3 группы) используют при обработке горных пород, бурении нефтяных скважин. Твердые сплавы на основе титана показывают хорошие результаты при получистовой обработке резанием конструктивных углеродистых и низколегированных сталей.

7.7. Сверхтвердые материалы, получение, состав и применение

Сверхтвердые материалы (алмаз, кубический нитрид бора) применяют для оснащения вставками лезвийных инструментов (резцы, сверла, торцовые фрезы). Такие инструменты используются для чистовой размерной обработки деталей при высоких скоростях резания (100–200 м/мин)

Первое место среди сверхтвердых материалов принадлежит **алмазу**, твердость которого в 6 раз выше твердости карбида вольфрама и в 8 раз – твердости быстрорежущей стали. Наиболее широкое применение имеют синтетические алмазы, имеющие поликристаллическое строение и отличающиеся меньшей хрупкостью и стоимостью. Алмаз теплостоек до температуры 800 °С, обладает хорошей теплопроводностью, снижающей разогрев режущей кромки при высоких скоростях резания.

Недостаток алмаза заключается в его высокой адгезии к железу, что является причиной его низкой износостойкости при точении сталей и чугунов. Алмазным инструментом обрабатывают цветные металлы и сплавы, обеспечивая при этом низкую шероховатость поверхности.

Большой универсальностью обладают инструменты из поликристаллического нитрида бора с кубической решеткой, называемого **кубическим нитридом бора** (КНБ), получаемого синтезом нитрида бора при высоких давлениях и температурах. В зависимости от технологии получения КНБ выпускают под следующими названиями (торговыми марками): эльбор, эльбор-Р, борозон. По твердости КНБ не уступает алмазу (0,9 твердости алмаза), но превосходит его по теплостойкости (1200–1400 °С) и химической инертности. Отсутствие у КНБ химического сродства к железу позволяет эффективно использовать его для обработки труднообрабатываемых сталей, в том числе и закаленных.

ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

8.1. Медь и ее сплавы, маркировка и применение

Медь – не распространенный в природе металл (0,01 % в земной коре), но объем его производства постоянно возрастает вследствие специальных свойств и находится на уровне алюминия. Это высокопластичный металл ($\delta = 50\text{--}60\%$), с низким пределом прочности ($\sigma_B = 200\text{--}240$ МПа), красноватого цвета. Температура плавления $1083\text{ }^\circ\text{C}$, плотность $8,94\text{ г/см}^3$, решетка ГЦК. По своим свойствам медь близка к золоту и серебру, является стойкой к атмосферной коррозии. Чистая медь обладает ценными техническими свойствами: высокой пластичностью, электро- и теплопроводностью, что обуславливает ее применение для производства электрических, телефонных проводов, деталей теплообменников, холодильников, а также в качестве основы сплавов для художественных изделий.

В зависимости от чистоты (наличия примесей кислорода, серы, фосфора, ртути) медь маркируют: М00 (99,99 % меди), М0 (99,95 %), М1 (99,9 %), М2 (99,7 %), М3 (99,5 %), М4 (99,0 % меди). Примеси понижают ее электропроводимость. Медь применяют в виде листов, прутков, труб, проволоки.

По способу изготовления деталей медные сплавы подразделяются на *деформируемые* (листы, прутки, полуфабрикаты) и *литейные* (фасонные отливки, художественные изделия). Большая часть медных сплавов не подвергается упрочняющей термической обработке, так как они однофазны, эффект упрочнения незначителен.

8.2. Латунни, маркировка, применение

Латунь – сплав меди с цинком. Латунни подразделяют на двойные и легированные. Они легко подвергаются пластической деформации. Латунни бывают легированными с добавкой других элементов (алюминия, железа, никеля и т. д.) и имеют повышенные механические свойства.

Практическое применение имеют латунни с содержанием цинка до 45 %. Латунни подразделяются на α -латунни (однофазные) с содержанием до 39 % цинка, где α -твердый раствор цинка в меди, и на $\alpha + \beta_1$ латунни (двухфазные), β_1 – твердый раствор на базе электронного соединения CuZn .

Маркировка. Латунни маркируются буквой «Л». Далее идут цифры, указывающие количество меди в сплаве (остальное – цинк), например, Л70, Л90. В легированных латуннях после буквы «Л» указаны буквы, обозначающие легирующие добавки (ЛС59-1, ЛАЖ 60-1-1). Первая цифра показывает среднее содержание меди, последующие цифры после букв – содержание легирующих элементов.

Двойные и легированные деформируемые латунни применяются для изготовления прутков, трубок, полос, лент, листов. Литейные латунни ЛК80-3, ЛМцЖ 52-4-1 и др. используют для получения литьем различной коррозионно-стойкой арматуры, винтов, гаек, подшипников.

8.3. Бронзы, маркировка, применение

Бронзой называют сплав меди со всеми элементами, кроме цинка и никеля. Цинк может присутствовать только при наличии других компонентов. Бронзы подразделяются на две большие группы: оловянистые и безоловянистые бронзы.

Маркировка. Буквенное обозначение бронзы – Бр, далее следуют буквы, обозначающие легирующие элементы, и цифры (содержание легирующих элементов).

Бронзы бывают деформируемыми и литейными. Они обладают высокими литейными свойствами, имеют малую усадку (до 1 %) и небольшую жидкотекучесть.

Наиболее широкое применение получили *оловянистые бронзы*, например, БрОЦ 4-4, БрОЦС 5-5-5 и др. Практическое применение находят сплавы с содержанием олова до 12 %. Механические свойства бронз резко снижаются с увеличением содержания олова. При большом содержании олова сплавы становятся хрупкими. Применяются для изготовления пружин, мембран, антифрикционных деталей, различной арматуры.

Безоловянистые бронзы – сплавы меди с алюминием, кремнием, бериллием и другими элементами. Они превосходят оловянистые бронзы по механическим и коррозионным свойствам, стоят дешевле, однако уступают по величине усадки. Алюминиевые бронзы БРАЖ9-4, БРАЖН11-4-4 используются для изготовления втулок, шестерен, труб, кремнистая бронза БрКМц3-1 – пружин, трубок, свинцовистая бронза БрС30 – подшипников.

8.4. Алюминий и его сплавы, маркировка и применение

Алюминий – один из самых распространенных металлов в природе (7,5 % в земной коре). Имеет решетку ГЦК, низкую температуру плавления (660 °С), не имеет аллотропических превращений. По сравнению с железом его плотность в 3 раза меньше (2,7 г/см³). Он применяется там, где необходима большая удельная прочность и малый удельный вес. Обладает высокими тепло-, электропроводностью, пластичностью (до 50 %), но малой прочностью и твердостью (предел прочности 60 МПа, предел текучести 20 МПа, твердость 25 НВ, относительное удлинение 40 %), большой коррозионной стойкостью на воздухе и в некоторых средах (вследствие образования на его поверхности тонкой прочной окисной пленки). Коррозионная стойкость тем выше, чем чище алюминий. Его электропроводность составляет 65 % от электропроводности меди. В зависимости от чистоты первичный алюминий маркируют:

A999 (99,999 % алюминия) – особой чистоты;

A995, A99, A97, A95 – алюминий высокой чистоты с 99,995–99,95 % алюминия;

A85, A8, A7, A6, A5, A0 – алюминий технической чистоты с 99,85–99,0 % алюминия.

Чистый алюминий как конструкционный материал не применяют из-за низкой прочности, но благодаря своим свойствам он эффективно используется по следующим трем направлениям:

в виде листов, профилей, прутков, фольги (вследствие высокой пластичности);

для изготовления проводов, шин, контакторов (электротехнических целей) в виду высокой электропроводности и малой плотности;

для изделий пищевой и химической промышленности, в быту (транспортировки и хранения продуктов питания, органических кислот) из-за хорошей коррозионной стойкости.

В металлургии алюминий применяется для раскисления стали. Однако наибольшее распространение он получил в качестве основы алюминиевых сплавов. По способу изготовления изделий и технологическим свойствам алюминиевые сплавы делятся на три группы.

Деформируемые – для получения полуфабрикатов методом пластической деформации (листы, ленты, проволока, трубы), а так же поковок и штамповок.

Литейные – для получения заготовок методами литья.

Спеченные – для получения изделий методами порошковой металлургии.

8.5. Деформируемые алюминиевые сплавы

Деформируемые алюминиевые сплавы характеризуются хорошей пластичностью в холодном и горячем состоянии, хорошими свариваемостью и обрабатываемостью резанием, низкой плотностью (2,56–2,80 г/см³), невысокими тепло- и электропроводностью, стабильностью сохранения структуры и свойств в области рабочих температур. Деформируемые сплавы подразделяются на **упрочняемые** и **неупрочняемые** термической обработкой.

Деформируемые сплавы, **неупрочняемые** термической обработкой, используются в отожженном, либо в наклепанном состояниях. Механические свойства их улучшаются за счет легирования твердого раствора и нагартовки, но при этом снижается пластичность. К ним относят двойные сплавы «алюминий – магний» (2–7 %) – магналии и системы «алюминий – марганец» (1–1,6 % марганца).

Деформируемые магналии АМг, АМгб имеют высокую коррозионную стойкость, хорошо свариваются, применяются для сварных емкостей, в судостроении. Алюминиево-марганцевые сплавы АМц в отожженном состоянии, имеющие высокую пластичность, но малую прочность ($\sigma_b = 110–120$ МПа, $\delta = 20–25$ %), применяются для изготовления деталей, работающих в агрессивных средах.

К деформируемым сплавам, **упрочняемым** термообработкой, относят сложные алюминиевые сплавы на основе тройных многокомпонентных систем:

дюралюмины – сплавы системы «алюминий – медь – магний» с добавкой марганца – Д1, Д16 повышенной прочности; Д19, ВД17 – повышенной жаропрочности; Д18 и В65 – заклепочные;

авиали – ковошные сплавы системы «алюминий – магний – кремний» – АВ, АК6, АК8 (0,4–0,9 % магния; 0,5–1,2 % кремния);

жаропрочные сплавы системы «алюминий – медь – марганец» – Д20, Д21 (6–7 % меди; 0,4–0,8 % марганца);

ковочные сплавы системы «алюминий – медь – магний» с добавками никеля и железа – АК4-1, АК6;

высокопрочные сплавы системы «алюминий – цинк – магний – медь» марок В95 – общего назначения, В94 – заклепочные. Данные сплавы упрочняются термической обработкой (закалкой) с после-

дующим искусственным или естественным старением. Наибольший эффект упрочнения обеспечивается упрочняющими фазами, которые при нагреве под закалку растворяются в α -твердом растворе и дополнительно его легируют. В процессе старения эти упрочненные фазы выделяются в виде дисперсных частиц в матрице сплава.

8.6. Литейные алюминиевые сплавы

К литейным алюминиевым сплавам (5 основных групп) относятся сплавы с элементами, которые образуют с алюминием легкоплавкие эвтектики, имеющие высокие литейные свойства.

1 группа. Системы «алюминий – кремний» – *силумины* АК12, АК9ч (10–13 % кремния). Их состав близок к эвтектическому $\approx 11,5\% Si$. Они характеризуются большой жидкотекучестью и малой усадкой (9 марок). При затвердевании кремний выделяется в виде грубых игольчатых кристаллов, что резко снижает механические свойства силуминов. Для повышения прочности и пластичности (измельчения структуры) такие силумины модифицируют, вводя в расплав небольшие добавки натрия (0,05–0,08 %) или другого модификатора. При этом механические свойства силуминов повышаются ($\sigma_b = 170\text{--}250$ МПа, $\delta = 3\text{--}5\%$).

2 группа. Сложные силумины систем «алюминий – кремний – магний», «алюминий – кремний – медь», «алюминий – кремний – магний – медь» (АК5М2, АК7ч, АК9М2, АК6М2 и др., всего 7 марок). Для повышения механических и технологических свойств силумины легируют магнием, марганцем, медью и подвергают дополнительной термической обработке.

3 группа. Сплавы, содержащие более 4 % меди, с ограниченной растворимостью меди в алюминии, со структурой α -твердого раствора и вторичной фазы Cu_2Al (3 марки), например, сложнoleгированный сплав АМ5. По жаропрочности они превосходят все литейные сплавы. Из них отливают мелкие детали, работающие при повышенных температурах. (250–300 °С).

4 группа. Сплавы системы «алюминий – магний», так называемые литейные *магналии* (АМг5К, АМг5Мц, АМг10 и др., всего 9 марок) характеризуются хорошими литейными свойствами, повышенной пластичностью, минимальной плотностью (2,58 г/см³), высокой коррозионной стойкостью. При сравнительно небольших нагревах (до 80 °С), наступает их разупрочнение, возможно образование трещин.

5 группа. К системам *алюминий – другие элементы* относят жаропрочные литейные сплавы АК12ММгН, АК12М2МгН и др. (всего 11 сплавов). Из них изготавливают поршни, головки цилиндров и другие детали, которые эксплуатируются при температурах до 250–300 °С. Эти сплавы подвергают сложной термической обработке.

8.7. Антифрикционные сплавы на основе меди, алюминия, свинца и олова

В машиностроении для изготовления подшипников скольжения широкое применение получили антифрикционные материалы, имеющие гетерогенную структуру, состоящую из мягкой и пластичной основы с твердыми включениями. *Антифрикционные (подшипниковые) сплавы* – сплавы на основе алюминия, меди, свинца, олова. *Антифрикционность* – способность материала обеспечивать низкий коэффициент трения скольжения и потери на трение, малую скорость изнашивания сопряжений (деталь – стальной вал).

Требования к антифрикционным сплавам. Они должны: 1) иметь достаточную твердость; 2) быть пластичными; 3) удерживать смазку; 4) иметь малый коэффициент трения; 5) обладать хорошей теплопроводностью; 6) иметь невысокую температуру плавления; 7) обладать устойчивостью против коррозии.

Из подшипниковых сплавов применяют баббиты системы $Pb\text{--}Sb$, $Sn\text{--}Sb$, $Pb\text{--}Sn\text{--}Sb$, а также на основе цинка (с добавками меди и алюминия), на основе алюминия (с добавками меди, никеля, сурьмы). *Баббиты* – мягкие (до 30 НВ) антифрикционные сплавы на оловянной и свинцовистой основах.

Оловянные и свинцовистые баббиты обладают хорошими антифрикционными свойствами, хорошо прирабатываются, но имеют низкое сопротивление усталости. Прочность баббитов $\sigma_b = 60\text{--}120$ МПа, твердость 13–35 НВ. Распространенными оловянными баббитами являются сплавы Б88, Б83 на основе системы сплавов «сурьма – олово». У них мягкая основа олово и твердые включения на основе химических соединений $SnSb$, Cu_3Sn . Применяются в подшипниках турбонасосов, тяжело нагруженных машин. Свинцовистые баббиты Б16, БН, БС6 имеют мягкую основу – эвтектику ($Pb + Sb$) и твердые включения и используются в машинах средней нагруженности.

Алюминиевые подшипниковые сплавы по сравнению с оловяными и свинцовистыми баббитами обладают более высокими свойствами (низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью), но менее технологичны.

Алюминиевые антифрикционные сплавы АОЗ-1, АО9-2, АО20-1 служат для получения биметаллической ленты со сталью во вкладышах подшипников скольжения. Данные сплавы используются в тяжело нагруженных скоростных подшипниках автомобильных и тракторных двигателей.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ

Глава 1. Атомно-кристаллическое строение металлов и сплавов

1. Укажите основные области применения конструкционных материалов.
2. Охарактеризуйте значение материаловедения в работе инженера.
3. Как классифицируют металлы в технике?
4. В чем сущность атомно-кристаллического строения металлов?
5. Укажите типы кристаллических решеток металлов.
6. Какие типы связей существуют в твердых телах?
7. Опишите строение реальных кристаллов.
8. Укажите дефекты кристаллического строения металлов.
9. Что такое аллотропия?
10. Что такое анизотропия сплавов?
11. Что представляет собой процесс кристаллизации?
12. Как изменяется свободная энергия вещества в твердом и жидком состояниях? Поясните на графике.
13. Чему равна свободная энергия сплава?
14. Как влияет степень переохлаждения, наличие примесей на процесс кристаллизации?
15. Укажите основные этапы процесса кристаллизации.
16. Как образуются зерна и дендриты?

Глава 2. Теория сплавов

1. Что такое сплав, компонент, фаза?
2. Что такое твердый раствор?
3. Дайте определение химического соединения.
4. Что представляют собой механические смеси, эвтектика?
5. Что такое диаграмма состояния сплавов?
6. Как строится диаграмма состояния двойных сплавов?
7. Что представляет собой кривая охлаждения бинарных сплавов?
8. Как определяют критические точки?
9. Что такое *ликвидус* и *солидус*?
10. Запишите в математической форме правило фаз.
11. Что подразумевается под числом степеней свободы системы?
12. Укажите основные типы диаграмм состояния двойных сплавов.

13. Сформулируйте правило отрезков.
14. Сформулируйте 2-ое положение правила отрезков.
15. Изобразите диаграмму состояния двойных сплавов при образовании в твердом состоянии механической смеси.
16. Изобразите диаграмму состояния двойных сплавов при неограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии
17. Изобразите диаграмму состояния двойных сплавов при ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии.
18. Изобразите диаграмму состояния двойных сплавов с образованием химического соединения.
19. Укажите взаимосвязь между видом диаграммы и свойствами двойных сплавов (закон Н. С. Курнакова).

Глава 3. Железоуглеродистые сплавы

1. Перечислите основные свойства железа.
2. Изобразите кривую охлаждения чистого железа.
3. Укажите аллотропические формы железа и их свойства
4. Назовите компоненты в железоуглеродистых сплавах.
5. Дайте определение цементита и укажите его свойства.
6. Для чего используется диаграмма состояния «железо – цементит», ее значение?
7. Дайте определение аустенита и феррита.
8. Укажите фазы в железоуглеродистых сплавах.
9. Сколько углерода содержится в цементите, аустените, феррите?
10. Дайте определение перлита.
11. Дайте определение ледебурита.
12. Укажите содержание углерода в перлите, ледебурите.
13. Перечислите свойства феррита, аустенита.
14. На диаграмме $Fe-Fe_3C$ для сплава с 2,5 % C при температуре 1200 °C определите состав и количественное соотношение фаз.
15. Постройте кривую охлаждения железоуглеродистого сплава с 3 % C, используя диаграмму $Fe-Fe_3C$ и правило фаз.
16. Для чего используется диаграмма состояния «железо – графит»?

Глава 4. Углеродистые и легированные стали. Чугуны

1. Что такое сталь?
2. Какое влияние оказывает содержание углерода на структуру стали?

3. Как влияет содержание углерода на механические свойства стали?
4. Какое влияние оказывают постоянные примеси на структуру и свойства стали?
5. Как классифицируются углеродистые стали по назначению?
6. Как классифицируют стали по химическому составу?
7. Как классифицируют углеродистые стали по качеству?
8. Как подразделяются стали по степени раскисления?
9. Как маркируют стали обыкновенного качества?
10. Как маркируются конструкционные углеродистые качественные стали?
11. Как маркируются инструментальные углеродистые стали?
12. Где применяются углеродистые стали?
13. Что такое легированные стали, их классификация и маркировка?
14. Где применяются легированные стали?
15. Что такое чугуны?
16. Какие постоянные примеси присутствуют в составе чугунов?
17. Опишите процесс графитизации чугуна.
18. Как классифицируют серые чугуны по форме графитных включений?
19. Какой чугун называется белым, его маркировка?
20. Как делятся белые чугуны по структуре?
21. Какие чугуны называются серыми, их свойства и применение?
22. Укажите основные структурные составляющие серых чугунов.
23. Как маркируются серые чугуны?
24. Как маркируются ковкие чугуны, их свойства и применение?
25. Как маркируются высокопрочные чугуны, их свойства и применение?
26. Укажите основные структурные составляющие высокопрочного чугуна.

Глава 5. Основы теории термической обработки

1. Что такое термическая обработка?
2. Изложите сущность образования аустенита при нагреве стали.
3. Что такое действительная и наследственная величина зерна?
4. Опишите кинетику превращений переохлажденного аустенита в стали.
5. Изобразите диаграмму изотермического распада аустенита.

6. Охарактеризуйте перлитное превращение при охлаждении стали.

7. Опишите промежуточное превращение при охлаждении стали.

8. Охарактеризуйте мартенситное превращение при охлаждении стали.

9. Как происходит изотермический распад аустенита?

10. Опишите превращения аустенита при непрерывном охлаждении стали.

11. Что такое критическая скорость заковки?

12. Что представляет собой мартенсит?

13. Какими свойствами обладает мартенсит?

14. Что представляют собой троостит и сорбит?

15. Укажите превращения в закаленной стали при отпуске.

Глава 6. Технология термической обработки

1. Как классифицируют виды термической обработки?

2. Как осуществляют нагрев при термической обработке?

3. Какие атмосферы применяют при нагреве?

4. Что такое отжиг, его виды?

5. Что такое нормализация?

6. Что такое закалка, ее виды?

7. Перечислите основные способы заливок, их применение.

8. Какие охлаждающие среды применяются при термической обработке?

9. Что такое прокаливаемость стали?

10. Назовите основные дефекты, возникающие при закалке.

11. Как проводится закалка с самоотпуском?

12. Что такое отпуск?

13. Как влияет температура отпуска на механические свойства сталей?

14. Какие существуют виды отпуска?

15. Что такое термомеханическая обработка стали?

16. Какие существуют методы поверхностного упрочнения стали?

17. Назовите способы поверхностной закалки.

18. Назовите методы поверхностного упрочнения стальных деталей.

19. Что такое химико-термическая обработка?

20. Поясните сущность химико-термической обработки.

21. Что такое цементация?

22. Какую термическую обработку проводят после цементации?

23. Для сталей с каким содержанием углерода применяется цементация?

24. В каких средах может осуществляться цементация?

25. Что такое азотирование?

26. Что такое цианирование?

27. Что такое нитроцементация?

28. Что такое диффузионная металлизация?

29. Какие марки сталей подвергают химико-термической обработке?

Глава 7. Инструментальные материалы

1. Что такое инструментальные стали?

2. Как классифицируют инструментальные стали?

3. Перечислите основные свойства инструментальных сталей и сплавов.

4. Какая термическая обработка используется для инструментальных сталей?

5. Охарактеризуйте основные области применения инструментальных сталей и сплавов.

6. Что такое теплостойкость инструментальных сталей и как они подразделяются?

7. Назовите основные свойства и применение низколегированных инструментальных сталей.

8. Какие стали относятся к быстрорежущим, где они применяются?

9. Какими свойствами обладают быстрорежущие стали?

10. Как маркируются быстрорежущие стали, какая их термическая обработка?

11. Каким способом изготавливаются твердые сплавы, какая их маркировка?

12. Какими свойствами обладают твердые сплавы, где они применяются?

13. Укажите основные свойства и применение сверхтвердых материалов.

Глава 8. Цветные металлы и сплавы

1. Какими свойствами обладает медь?

2. Какие существуют сплавы на основе меди?

3. Где применяются медь и сплавы на ее основе?

4. Какие существуют марки меди?
5. Что такое бронза?
6. Какие существуют бронзы?
7. Что такое латунь?
8. Какие марки латуни Вы знаете?
9. Какими свойствами обладает алюминий?
10. Где применяется алюминий и его сплавы?
11. Какие существуют сплавы на основе алюминия?
12. Какие марки алюминия Вы знаете?
13. Какие Вы знаете литейные сплавы на основе алюминия?
14. Назовите деформируемые сплавы на основе алюминия.
15. Какие Вы знаете антифрикционные сплавы?
16. Перечислите требования к антифрикционным сплавам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в пособии вопросы металловедения позволяют студентам очной и заочной форм обучения высших учебных заведений агроинженерного профиля освоить основы материаловедения, изучить типы диаграмм равновесного состояния двойных сплавов, диаграммы состояния сплавов «железо – углерод», классификацию, маркировку и применение железоуглеродистых сплавов и цветных металлов, способы термической обработки сталей.

Приведенные в достаточном объеме определения структур и свойств металлов и сплавов, классификация и маркировка сталей и чугунов, цветных металлов, методы термической обработки стали будут полезны в их дальнейшей инженерной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Андрушевич, А. А.* Материаловедение: учебно-методический комплекс / А. А. Андрушевич, Т. К. Романова. – Минск: БГАТУ, 2008. – 192 с.

2. *Арзамасов, Б. Н.* Материаловедение: учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – Изд. 3-е, стереотип. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 648 с.

3. *Гуляев, А. П.* Металловедение: учебник для вузов / А. П. Гуляев. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – Москва: Metallurgy, 1986. – 544 с.

4. *Евстратова, Н. Н.* Материаловедение: учебное пособие / Н. Н. Евстратова, В. Т. Компанец, В. А. Сухарникова. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 268 с.

5. *Лахтин, Ю. М.* Материаловедение: учебник для высш. технич. учебн. заведений / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1990. – 528 с.

6. *Пейсахов, А. М.* Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник для студ. немашиностроит. спец. / А. М. Пейсахов, А. М. Кучер. – Санкт-Петербург: Изд-во Михайлова В. А., 2003. – 406 с.

7. *Фетисов, Г. П.* Материаловедение и технология металлов: учебник для вузов / Г. П. Фетисов [и др.]. – М.: Высшая школа, 2005. – 861 с.

Дополнительная литература

8. *Капцевич, В. М.* Материаловедение и технология конструкционных материалов: методические указания к лабораторным работам для студентов заочной формы обучения / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2008. – 105 с.

9. *Ржевская, С. В.* Материаловедение: учебник для вузов / С. В. Ржевская – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Москва: Логос, 2004. – 424 с.

10. *Смирнов, М. А.* Основы термической обработки стали / М. А. Смирнов, В. М. Счастливец, Л. Г. Журавлев. – Москва: Наука и технологии, 2002. – 420 с.

11. Технология конструкционных материалов: учебник для студ. техн. спец. вузов / О. С. Комаров [и др.]; под общ. ред. О. С. Комарова. – Минск: Новое знание, 2005. – 560 с.

12. Технология конструкционных материалов: учебник для машиностроит. вузов / А. М. Дальский [и др.]; под общ. ред. А. М. Дальского. – Изд. 6-е, испр. и доп. – Москва: Машиностроение, 2005. – 592 с.

13. Энциклопедический справочник термиста-технолога. В 3-х томах. – Москва: Наука и технологии, 2004. – 1704 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Андрушевич Андрей Александрович,
Романова Татьяна Константиновна

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Пособие

Ответственный за выпуск *В. М. Капцевич*
Редактор *Н. А. Антипович*
Компьютерная верстка *А. И. Стебуля*

Подписано в печать 15.07.2010 г. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,97. Уч.-изд. л. 5,45. Тираж 280 экз. Заказ 684.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
ЛИ № 02330/0552841 от 14.04.2010.
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.
Пр. Независимости, 99–2, 220023, Минск.