

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Майкопский государственный технологический
университет»

Кафедра «Стандартизации, метрологии и товарной экспертизы»

Методические указания по изучению лекционного материала по
дисциплине «Материаловедение» для бакалавриата направления
подготовки 38.03.07. «Товароведение»
очной и заочной форм обучения

УДК 620.22(07)

ББК 30.3

М 54

Печатается по решению научно-технического совета МГТУ

Составитель: Сиюхова Н.Т. – кандидат с.-х. наук, доцент

Методические указания по изучению лекционного материала по дисциплине «Материаловедение» для бакалавров по направлению подготовки 38.03.07 «Товароведение»

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
ТЕМА 1. АТОМНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ	5
Лекция 1. Аморфные и кристаллические тела. Структурный анализ. Строение металлов и их свойства.....	5
Лекция 2. Кристаллизация металлов и структура атомно- кристаллического строения. Анизотропия кристаллов	13
Лекция 3. Процесс кристаллизации металлов и сплавов. Строение металлического слитка.....	19
ТЕМА 2. ПОНЯТИЕ О ДИАГРАММАХ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ.....	28
Лекция 4. Диаграмма состояния.....	28
Лекция 5. Термическая и химико-термическая обработка стали. Отжиг	37
Лекция 6. Закалка и отпуск стали	40
ТЕМА 3. МАТЕРИАЛЫ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ.....	45
Лекция 7. Металлические материалы	45
Стали	46
Чугуны	53
Лекция 8. Неметаллические материалы	56
Пластические массы и другие неметаллические материалы	56
Резиновые материалы	63
Лекция 9. Композиционные материалы	64
Материалы порошковой металлургии	68
Свойства порошковых материалов	69
Методы изготовления порошковых материалов	74
Библиографический список	77

ВВЕДЕНИЕ

Материаловедение – наука о материалах, их строении и свойствах. Использование материалов всегда зависело от прочности, надёжности и долговечности выполненных из них деталей.

Конструирование, изготовление, эксплуатация и ремонт машин и приборов связаны с машиностроительными материалами и их использованием. В связи с этим необходимо иметь представление:

- о закономерностях формирования структуры материалов;
- связях структуры и состава материалов с их эксплуатационными характеристиками;
- требованиях, предъявляемых к материалам на всех этапах жизненного цикла продукции;
- возможностях вторичного использования материалов. Вопросы строения и свойств металлов, сплавов, неметаллических материалов, горюче-смазочных материалов и эксплуатационных жидкостей, применяемых в конструкциях и необходимых для их эксплуатации и ремонта, рассматривает материаловедение.

Материалы – это исходные вещества для производства продукции и вспомогательные вещества для проведения производственных процессов. Различают следующие разновидности материалов:

- *сырьё*, или *сырые материалы*, которые подлежат дальнейшей переработке (железная руда на металлургическом заводе, нефть на нефтеперерабатывающем комбинате);
- *полуфабрикат* – переработанный материал, который должен пройти одну или несколько стадий обработки, для того чтобы стать изделием, годным к потреблению. Готовая продукция одного производства может служить полуфабрикатом для другого. Для успешного решения

многих практических задач необходимы сведения о современных способах получения и обработки материалов, их свойствах и рациональном применении.

ТЕМА 1. АТОМНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Металлы всегда занимали особое место в жизни человека, это заметно даже в названиях эпох (золотой, серебряный, бронзовый, железный века), на которые греки делили историю человечества в археологических находках металлических изделий (кованые, медные украшения, сельскохозяйственные орудия) и в повседневном использовании металлов и сплавов в современной технике.

Металлы и их сплавы – являются важнейшими конструкционными материалами, широко применяющимися в машиностроении. Они обладают многими ценными свойствами, обусловленными в основном их внутренним строением, которые отличают их от других материалов и делают во многих случаях незаменимыми.

Мягкий и пластичный металл или сплав можно сделать твёрдым, хрупким, и наоборот. Для того чтобы сознательно изменять свойства металлов, необходимо знать основы их кристаллического строения. Как известно, все тела состоят из большого количества атомов, которые удерживаются силами сцепления, совершая колебания большой частоты возле точек равновесия. Поскольку атомы разных металлов различны, каждый металл имеет свои определённые свойства. Эти свойства зависят от расположения атомов между собой, характера их связей, от расстояния между ними. Если изменить расстояние между атомами или порядок их расположения, изменятся и свойства металла.

Лекция 1. Аморфные и кристаллические тела. Структурный анализ. Строение металлов и их свойства

Все существующие в природе твёрдые неорганические тела по своим свойствам делятся на два класса: кристаллические и аморфные.

Кристаллические тела остаются твёрдыми, т.е. сохраняют свою форму, до вполне определённой температуры, при которой они переходят в жидкое состояние. При охлаждении процесс идёт в обратном направлении. При этом температура плавления остаётся постоянной, а процесс плавления или кристаллизации происходит в течение некоторого времени при постоянном значении температуры, о чём свидетельствует горизонтальный участок представленных графиков.

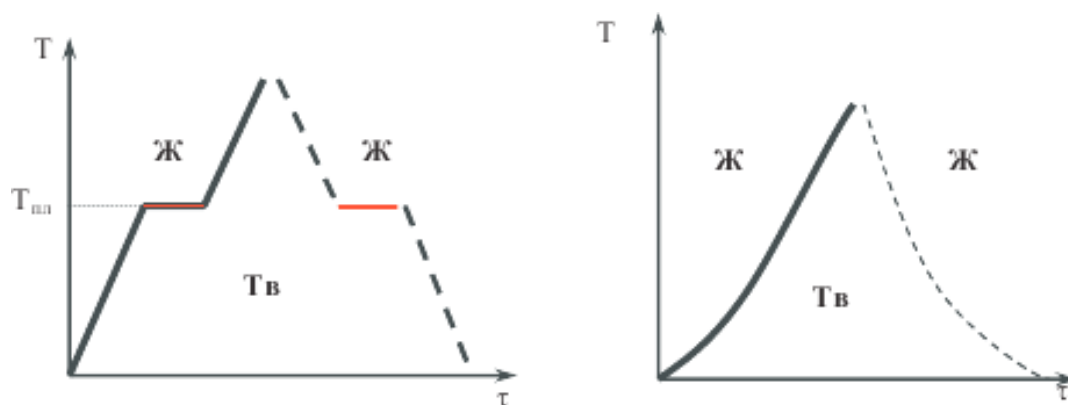


Рис. 1. Температурные кривые кристаллического и аморфного вещества

Аморфными называют материалы, в которых расположение образующих их элементарных частиц (атомов или молекул) – хаотично, т.е. неупорядочено. При нагреве аморфные тела размягчаются в большом температурном интервале; сначала они становятся вязкими и лишь затем переходят в жидкое состояние. К числу таких материалов относятся пластмассы, стекло, керамики, резины.

В аморфных телах – смоле, стекле, канифоли и т.п. – атомы расположены беспорядочно. В металлах они находятся в определённом геометрическом порядке, образуя кристаллы, поэтому металлы являются кристаллическими телами. Металлы различаются не только порядком расположения атомов, но и кристаллической решёткой, которая представляет собой воображаемую пространственную сетку, состоящую из элементарных ячеек, в узлах которой находятся атомы.

Свойства кристалла зависят от электронного строения атомов и характера их взаимодействия, от пространственного расположения элементарных частиц, химического состава, размера и формы кристаллов. Все эти детали строения кристаллов описывает понятие «структура», другими словами – это внутреннее строение материала.

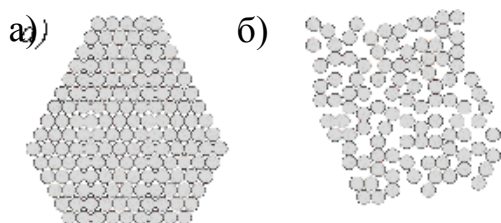


Рис. 2. Расположение атомов в кристаллическом (а) и аморфном (б) веществе

В зависимости от размеров структурных составляющих и применяемых методов их выявления используют такие понятия, как тонкая структура (субструктура), микро- и макроструктура.

Макроструктура – строение, выявляемое невооружённым глазом или при небольших увеличениях с помощью лупы, при этом выявляются крупные дефекты: трещины, усадочные раковины, газовые пузыри и т.д., а также неравномерность распределения примесей в металле.

Макроструктуру можно исследовать по излому и на специальных макрошлифах. Изучение излома – наиболее простой метод выявления кристаллического строения металлов. По излому можно судить о размере зерна, особенностях выплавки и литья, термической обработки, а следовательно, и о некоторых свойствах металла. Вид излома используют в качестве критерия при определении склонности стали к хрупкому разрушению. Исследование макроструктуры, несмотря на простоту, является очень ценным методом изучения материалов.

Макрошлиф – это образец металла или сплава, одна из сторон которого отшлифована, тщательно обезжирена, протравлена растворами, содержащими щёлочи или кислоты, и рассматривается с помощью лупы.

Научная цель макроанализа – установление закономерности влияния факторов на формирование макроструктуры. Макроанализ позволяет выявить форму, размеры и расположение зёрен в разных частях изделия, обнаружить макродефекты металла (раковины, пористость, газовые включения, расслоения).

Микроанализ выявляет структуру металла или сплава по микрошлифам, приготовленным так же, как и для макроанализа, но дополнительно отполированным до зеркального блеска. Шлифы рассматриваются в отражённом свете под оптическим микроскопом. Из-за различной ориентировки зёрен металла они травятся не в одинаковой степени и под микроскопом свет также отражается неодинаково. Границы зёрен, благодаря примесям, травятся сильнее, чем основной металл, и выявляются более рельефно. В сплаве структурные составляющие травятся также различно.

Этот важнейший анализ определяет размеры и форму зёрен, структурные составляющие, неметаллические включения и их характер – трещины, пористость и т.д., качество термической обработки. Зная микроструктуру, можно объяснить причины изменения свойств металла, она характеризует мелкие структурные составляющие, наблюдение которых возможно с помощью оптических микроскопов с увеличением от 60 до 1500–2000 раз.

Микроанализ позволяет установить размеры и форму кристаллов, их распределение, форму инородных включений и микропустот, ориентацию кристаллов и т.п.

Тонкая структура – позволяет определить расположение элементарных частиц в материале и электронов в атоме.

Строение и свойства вещества на этом уровне определяются типом связей между элементарными частицами. Различают три основных типа связи: **ионный, ковалентный и металлический.**

Образование ионной связи происходит путём передачи атомом одного элемента валентного электрона атому другого элемента. Это приводит к образованию положительного и отрицательного ионов, которые притягиваются друг к другу электростатически.

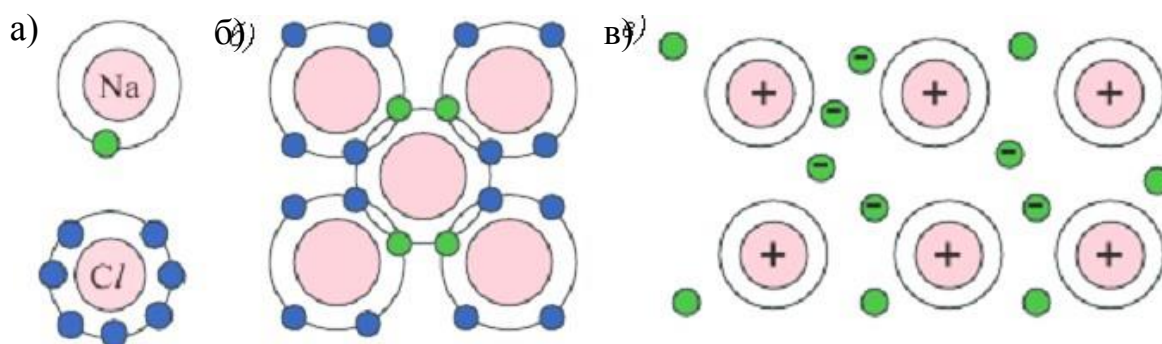


Рис. 3. Основные виды атомных связей

а – ионная связь; б – ковалентная связь; в – металлическая связь

Образование ионной связи удобно рассмотреть на примере соединения NaCl. Атом Na имеет один «лишний» валентный электрон. В то же время атому Cl, имеющему семь валентных электронов, для образования устойчивой оболочки, «не хватает одного электрона. Атом Na передаёт свой валентный электрон атому Cl, в результате образуется положительный ион Na⁺ и отрицательный ион Cl⁻, которые, притягиваясь, создают ионную связь.

Ионные кристаллы обычно хрупкие, довольно тугоплавкие, у них низкая тепло- и электропроводность.

Ковалентный тип связи осуществляется обобществлением (объединением) валентных электронов соседних атомов. Типичным телом с такой связью является – алмаз, состоящий из атомов углерода с четырьмя валентными электронами.

При довольно высокой механической прочности связи все ковалентные кристаллы хрупкие, температура плавления, тепловые и электрические свойства колеблются у них в широком диапазоне.

Металлическая связь образуется следующим образом. На внешних оболочках атомов металлов находится меньше четырёх валентных электронов, слабо связанных с атомным ядром. Поэтому при близком расположении атомов валентные электроны легко теряют связь с отдельными атомами и становятся общими, т.е. коллективизируются. При этом атомы превращаются в положительно заряженные ионы, а освободившиеся электроны свободно перемещаются между периодически расположенными ионами, не принадлежа (в отличие от ковалентной связи) ни отдельному атому, ни какой-либо их малой группе.

Металлическая связь является ненаправленной, благодаря чему при пластической деформации, связь между ионами не нарушается и разрушение не происходит. Ионы как бы плавают в облаке электронного газа, образованного свободно перемещающимися электронами, что обуславливает высокую пластичность металлов. Наличие электронного газа объясняет также высокую электро- и теплопроводность элементов с металлической связью.

Металлы – вещества, обладающие высокой тепло- и электропроводностью, ковкостью (пластичностью), блеском и другими свойствами, обусловленными наличием в них большого числа свободно перемещающихся электронов.

Каждый металл отличается строением и свойствами, тем не менее, по некоторым признакам их можно объединять в группы. Прежде всего, металлы по цвету можно разделить на чёрные и цветные.

Чёрные металлы имеют тёмно-серый цвет, большую плотность (кроме щелочноземельных), высокую температуру плавления, относительно высокую твёрдость и во многих случаях обладают полиморфизмом (способностью менять кристаллическое строение).

Цветные металлы чаще всего имеют характерную окраску: красную, жёлтую, белую. Обладают большой пластичностью, малой твёрдостью, относительно низкой температурой плавления, для них характерно отсутствие полиморфизма.

Твёрдые вещества, как правило, имеют **кристаллическое строение**. Оно характеризуется правильным расположением частиц в строго определённых точках пространства. При мысленном соединении этих точек пересекающимися прямыми линиями образуется пространственный каркас, который называют **кристаллической решёткой**.

Различают следующие кристаллические решётки металлов с плотной упаковкой атомов: **кубическую объёмно-центрированную, кубическую гранецентрированную и гексагональную**. В ячейке кубической объёмно-центрированной решётки атомы расположены в вершинах и центре куба. Такая ячейка содержит девять атомов (хром, вольфрам, ванадий, молибден, литий, а при определённых температурах – железо и другие металлы).

Типы кристаллических решёток. Вещество может находиться в трёх состояниях: газообразном, жидком и твёрдом, и при определённых условиях (давлении p , температуре T) переходить из одного состояния в другое. Подавляющее большинство металлов имеет объёмно-центрированные решётки, гранецентрированные кубические решётки, либо гексагональные плотноупакованные. Краткие обозначения этих типов решёток – ОЦК, ГПУ и ГЦК соответственно. Кристаллические решётки **характеризуются**: 1) симметрией; 2) параметрами или периодами решётки; 3) координационными числами; 4) базисом решётки.

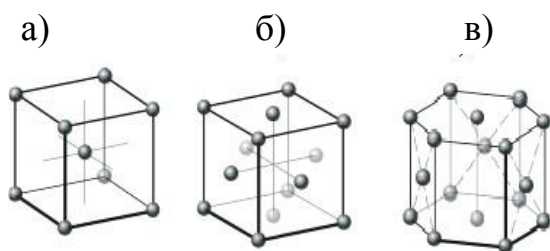


Рис. 4. Основные типы кристаллических решёток:
а – объёмно-центрированная кубическая; б – гранецентрированная кубическая; в – гексагональная плотноупакованная

Координационным числом (Z) называется число атомов, находящихся на наиболее близких и одинаковых расстояниях от произвольно выбранного любого атома в решётке. Для ОЦК решёток $Z = 8$, для ГЦК и ГПУ – 12.

Базисом решётки называется количество атомов в одной элементарной ячейке. Для ОЦК решёток базис равен 2, для ГЦК – 4, для ГПУ – 6.

Строение реальных металлов отличается от идеальных. В реальных кристаллах всегда содержатся дефекты, которые подразделяются по геометрическим признакам на точечные, линейные и поверхностные.

Локальные несовершенства (**дефекты**) в строении кристаллов присущи всем металлам. Эти нарушения идеальной структуры твёрдых тел оказывают существенное влияние на их физические, химические, технологические и эксплуатационные свойства. Без использования представлений о дефектах реальных кристаллов невозможно изучить явления пластической деформации, упрочнение и разрушение сплавов и др.

Наиболее дефектные участки в структуре – границы зёрен, т.е. места стыка зёрен. По границе, помимо примесей, концентрируются и дефекты кристаллической решётки: **вакансии и дислокации**. Дефекты кристаллического строения удобно классифицировать по их геометрической форме и размерам.

Точечными дефектами называются такие нарушения периодичности кристаллической решётки, размеры которых во всех трёх измерениях сопоставимы с размерами атома. К ним относят вакансии, межузельные атомы основного вещества, чужеродные атомы внедрения (рис. 5).

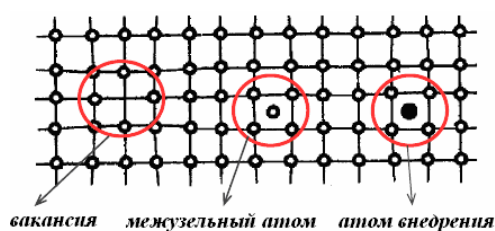


Рис. 5. Точечные дефекты решётки

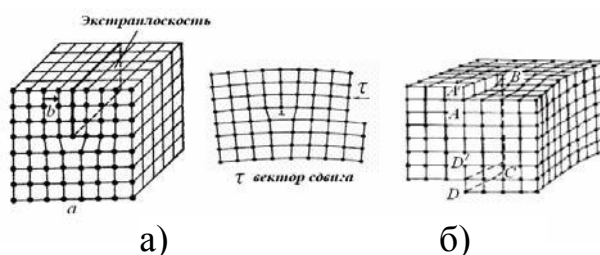


Рис. 6. Схема краевой и винтовой дислокаций

Линейными дефектами называют такие нарушения в кристаллической решётке, которые имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяжённость в третьем. Этот вид дефектов называется **дислокациями** (в пер. с англ. dislocation – смещение, сдвиг). Краевая дислокация образована краем «экстраплоскости» (лишней полуплоскости).

Винтовая дислокация, как и краевая, представляет собой результат как бы сдвижения части одного участка в кристалле относительно другого. Она соответствует оси спиральной структуры в кристалле, характеризуемому искажением, которое присоединяется к нормальным параллельным плоскостям, вместе формирующим непрерывную винтовую наклонную плоскость (с одним периодом), вращающуюся относительно дислокации.

Поверхностные дефекты малы только в одном направлении и имеют плоскую форму – это границы зёрен.

Объёмные имеют во всех трёх измерениях относительно большие размеры – это поры, трещины.

Структурные несовершенства (дефекты) в кристаллах возникают в результате кристаллизации металла, термической обработки, пластической деформации и оказывают существенное влияние на

упрочнение и разрушение металла при обработке. В кристаллической решётке реальных металлов имеются различные дефекты (несовершенства), которые нарушают связи между атомами и оказывают влияние на свойства металлов.

Чистые металлы получить технически очень трудно и по этой причине в металле присутствуют примеси различного происхождения. В зависимости от природы примесей и условий попадания их в металл они могут быть растворены в металле или находиться в виде отдельных включений. Если атомы примесей значительно меньше атомов основного металла, то они образуют растворы внедрения, а если больше – то образуют растворы замещения. В том и другом случаях решётка становится дефектной и искажения её влияют на свойства металла.

Наличие дислокаций и несовершенство кристаллов, с одной стороны, оказывают ослабляющий эффект на металл, а при определённых условиях дефекты могут упрочнять металл. Поверхностные дефекты наблюдаются прежде всего на границах зёрен.

Наклёп и рекристаллизация. При пластической деформации изменяется не только форма и размеры металла, но также его внутреннее строение и механические свойства. Зёрна разворачиваются, деформируются и сплющиваются, вытягиваясь в направлении деформации. Образуется волокнистая структура. При этом прочность и твёрдость металла повышаются, а пластичность и вязкость снижаются. Явление упрочнения металла при пластической деформации называется **наклёпом**. Волокнистое строение и наклёп могут быть устранены при нагреве металла. Частичное снятие наклёпа происходит уже при небольшом нагреве (до 300...400 °С для железа). Но волокнистая структура при этом сохраняется. При нагреве до более высокой температуры в металле происходит образование новых равноосных зёрен. Этот процесс называется **рекристаллизацией**. Наклёп при этом снимается полностью.

Если деформирование металла происходит при температуре, которая выше температуры рекристаллизации, то наклёп после деформации не возникает. Такая деформация называется горячей. При горячей деформации идут одновременно процессы упрочнения и рекристаллизации. Деформация, которая происходит ниже температуры рекристаллизации, называется холодной.

Лекция 2. Кристаллизация металлов и структура атомно-кристаллического строения. Анизотропия кристаллов

Любое вещество может находиться в трёх агрегатных состояниях: твёрдом, жидком, газообразном.

подавляющее большинство металлов получают путём кристаллизации из жидкого состояния. Кристаллизация протекает в условиях, когда система переходит к термодинамически более устойчивому состоянию с минимумом свободной энергии. Состояние любого вещества определяется температурой и давлением.

Возможен переход из одного состояния в другое, если новое состояние в новых условиях является более устойчивым, обладает меньшим запасом энергии. Как известно, любая система обладает запасом внутренней энергии, которая формально состоит из двух частей – свободной энергии F и так называемой связанной энергии TS , тогда

$$F = U - TS,$$

где U – полная энергия;

T – абсолютная температура системы;

S – энтропия.

Энтропия служит мерой внутреннего беспорядка (хаотичности) в расположении частиц системы. Равенство свободных энергий жидкого и твёрдого состояний при температуре, равной T_s , обуславливает их сосуществование – состояние равновесия.

При температурах ниже T_s будет происходить кристаллизация, а выше T_s – плавление металла. В этой (\bullet), равной T_s , жидкая и твёрдая фаза обладают одинаковой энергией, металл в обоих состояниях находится в равновесии, поэтому две фазы могут существовать одновременно бесконечно долго. Температура T_s – *равновесная* или *теоретическая температура кристаллизации*.

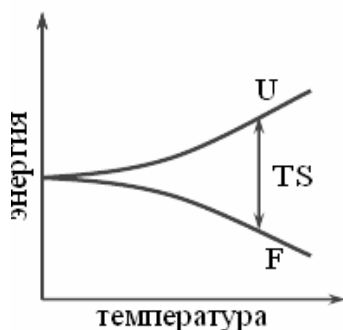


Рис. 7. Зависимость энергии вещества от температуры

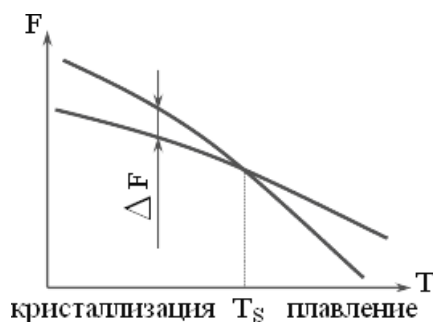


Рис. 8. Зависимости свободной энергии твёрдого и жидкого состояний вещества

Равновесное состояние – когда в сплаве все фазы, присущие этой системе, оформлены. Это состояние обеспечивается при медленном охлаждении, можно различать размеры и формы фаз. Неравновесное состояние – процесс образования и обособления фаз не закончился, образуется при быстром охлаждении.

Изменение температуры приведёт к нарушению равновесия, окажется возможным переход вещества в фазу с меньшей свободной энергией.

На кривой 1 показан идеальный процесс кристаллизации металла без переохлаждения. Сначала температура понижается равномерно – кривая идёт вниз. При достижении температуры затвердевания падение температуры прекращается – на кривой образуется горизонтальный участок.

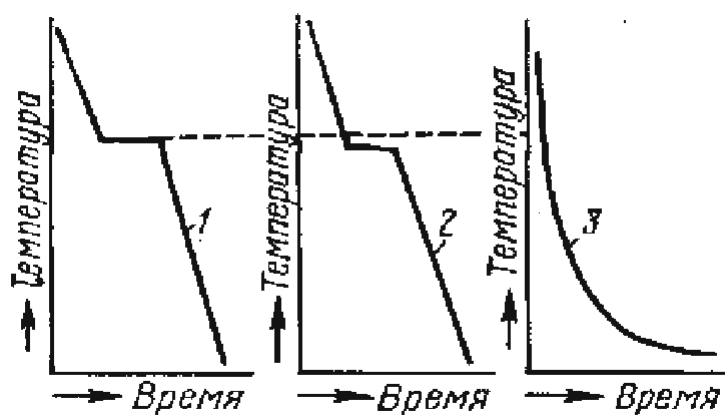


Рис. 9. Кривые охлаждения при кристаллизации:

- 1 – теоретическая кривая кристаллизации металла;
- 2 – кривая кристаллизации металла с переохлаждением;
- 3 – кривая кристаллизации неметалла

Это объясняется тем, что группировка атомов идёт с выделением тепла. По окончании затвердевания температура снова понижается. По закону кристаллизации чистых металлов каждый металл кристаллизуется при строго индивидуальной температуре. Практически кристаллизация протекает несколько иначе, так как часто имеет место переохлаждение, т.е. металл при температуре затвердевания остаётся жидким, и кристаллизация начинается при более низкой температуре. Разница между идеальной и истинной температурой кристаллизации называется **степенью переохлаждения**.

Кривая 2 соответствует процессу кристаллизации с переохлаждением.

Кривая 3 характерна для кристаллизации неметаллов: нет чётко выраженной температуры кристаллизации, затвердевание происходит постепенно. Постоянная температура кристаллизации – это свойство, которое отличает кристаллическое тело от аморфного.

Степень переохлаждения является важнейшим фактором, определяющим величину зерна. При большой скорости охлаждения степень переохлаждения больше и зёрна мельче.

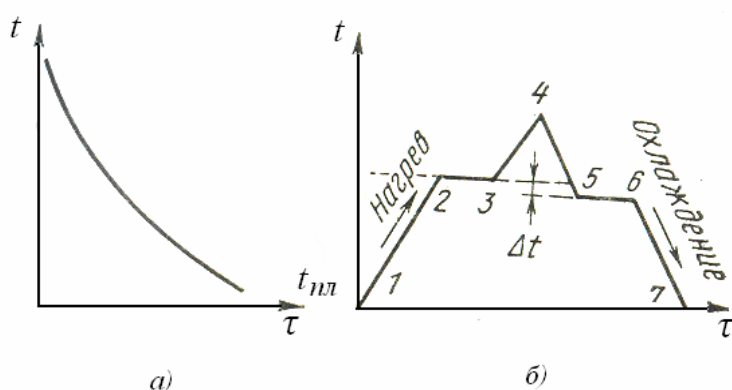


Рис. 10. Кривые охлаждения и плавления

На участке кривой 1-2 (см. рис. 10б) подвод тепла сопровождается повышением температуры металла, сохраняющего свою кристаллическую решётку. На участке 2-3 подвод тепла продолжается, но он не приводит к повышению температуры, т.е. подводимая энергия целиком расходуется на разрушение кристаллической решётки, переход атомов в неупорядоченное состояние. Внешне это проявляется в переходе твёрдого состояния в жидкое. В точке 3 разрушаются последние участки кристаллической решётки, и продолжающийся подвод тепла вызывает повышение температуры жидкого металла (3-4).

При охлаждении происходит обратный процесс. На участке 5-6 происходит кристаллизация, сопровождающаяся выделением тепла, которое называется **скрытой теплотой кристаллизации**. Для начала процесса кристаллизации необходимо, чтобы процесс сопровождался уменьшением свободной энергии системы. Это возможно при охлаждении жидкости ниже температуры T_s . Появление площадки на кривой охлаждения обусловлено тем, что в момент появления первых кристаллов выделяется скрытая теплота кристаллизации, которая и компенсирует охлаждение.

Охлаждение жидкости ниже равновесной температуры кристаллизации называется *переохлаждением*, которое характеризуется **степенью переохлаждения** ($\otimes T$):

$$\otimes T = T_{\text{теор}} - T_{\text{кр}}.$$

Степень переохлаждения зависит от природы металла, от степени его загрязнённости (чем чище металл, тем больше степень переохлаждения), от скорости охлаждения (чем выше скорость охлаждения, тем больше степень переохлаждения). Следовательно, чем меньше загрязнён металл, тем больше степень переохлаждения при кристаллизации.

Если металл очень сильно переохладить, то число центров и скорость роста кристаллов равны нулю, жидкость не кристаллизуется, образуется аморфное тело. Для металлов, обладающих малой склонностью к переохлаждению, экспериментально обнаруживаются только восходящие ветви кривых.

Силы взаимодействия между атомами в кристаллах по разным направлениям неодинаковы.

Поэтому механические, тепловые, электрические и оптические свойства кристаллов по разным направлениям оказываются различными. Это свойство кристаллов называется **анизотропией**.

Все кристаллы **анизотропны**, аморфные тела (стекло, смола) **изотропны**, т.е. имеют одинаковую плотность атомов в различных направлениях.

Физические свойства кристалла определяются не его цветом, а внутренним строением.

Кристаллические тела также могут быть подразделены на *монокристаллы* и *поликристаллы*. **Монокристалл** – твёрдое тело, частицы которого образуют единую кристаллическую решётку. Определённый порядок в расположении частиц распространяется на весь объём монокристалла. Упорядоченное внутреннее расположение частиц в монокристалле приводит к тому, что и его внешняя форма является *правильной*. Углы между внешними гранями монокристалла оказываются постоянными. К монокристаллам относятся природные кристаллы (кварц, алмаз, турмалин), крупинки соли, сахара, соды.

Поликристалл – твёрдое тело, состоящее из беспорядочно ориентированных монокристаллов.

Третьим видом твёрдого тела являются **композиты**. Атомы в композитах располагаются трёхмерно упорядоченно в определённой области пространства, но этот порядок не повторяется с регулярной периодичностью. Композиты, такие как дерево, бетон и др., состоят из различных, связанных друг с другом материалов.

Анизотропия свойств важна при использовании *монокристаллов* – одиночных кристаллов, частицы которых расположены единообразно по всему их объёму. Монокристаллы имеют правильную кристаллическую огранку (в форме естественных многогранников), анизотропны по механическим, электрическим и другим физическим свойствам.



Рис. 11. Дендриты и зерна

Рост кристаллов происходит по дендритной (древовидной) схеме, характеризующейся тем, что вначале к зародышам присоединяются все новые атомы жидкого металла в направлении, имеющем наибольшую плотность упаковки. В результате вырастают длинные ветви, которые называются осями первого порядка.

По мере роста кристалла на осях первого порядка появляются и начинают расти ветви второго порядка, от которых ответвляются оси третьего порядка и т.д., в последнюю очередь идёт кристаллизация в участках между осями. Дендриты растут до тех пор, пока не соприкоснутся друг с другом. После этого окончательно заполняются межосевые пространства и дендриты, деформируя друг друга, превращаются в кристаллы с неправильной внешней огранкой.

Дендритная кристаллизация характеризуется тем, что рост зародышей происходит с неравномерной скоростью.

Металлы и сплавы, применяемые в технике, обычно имеют поликристаллическую структуру, т.е. состоят из множества мелких и различно ориентированных кристаллов, не имеющих правильной кристаллической огранки и называемых *кристаллитами* (или *зёрнами*).

Зерно – это кристалл неправильной формы. Мелкое зерно является прочным, крупное – хрупким.

Граница зёрен – это поверхность, по обе стороны от которой кристаллические решётки различаются пространственной ориентацией. Эта поверхность является двумерным дефектом. На границах зёрен в процессе кристаллизации металла скапливаются различные примеси, образуются дефекты, неметаллические включения, оксидные плёнки. В результате металлическая связь между зёрнами нарушается и прочность металла снижается. Состояние границ зёрен металла оказывает большое влияние на их свойства.

Оптимальными условиями для получения мелкозернистой структуры необходимо: **максимальное число центров кристаллизации и малая скорость роста кристаллов**. Размер зёрен при кристаллизации зависит и от числа частичек нерастворимых примесей, которые играют роль готовых центров кристаллизации – оксиды, нитриды, сульфиды.

Чем больше частичек, тем мельче зёрна закристаллизовавшегося металла. Стенки изложниц имеют неровности, шероховатости, которые увеличивают скорость кристаллизации.

Чем больше скорость образования зародышей и меньше скорость их роста, тем меньше размер кристалла (зерна), выросшего из одного зародыша, и, следовательно, более мелкозернистой будет структура металла.

По механизму воздействия различают:

- 1) вещества, не растворяющиеся в жидком металле, выступают в качестве дополнительных центров кристаллизации;
- 2) поверхностно-активные вещества, которые растворяются в металле и, осаждаясь на поверхности растущих кристаллов, препятствуют их росту.

Величина зёрен зависит от числа центров кристаллизации и скорости роста кристаллов. Чем больше центров кристаллизации, тем мельче зерно металла. Величина зёрен, образующихся при кристаллизации, зависит не только от количества самопроизвольно зарождающихся центров кристаллизации, но также и от количества нерастворимых примесей, всегда имеющих в жидком металле. На образование центров кристаллизации влияет и скорость охлаждения. Чем выше скорость охлаждения, тем больше возникает центров кристаллизации и, следовательно, мельче зерно металла.

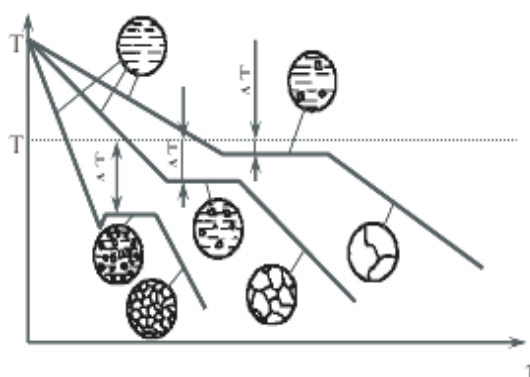


Рис. 12. Зависимость размера зерна от переохлаждения

В реальных условиях самопроизвольное зарождение кристаллов в жидком металле затруднено. Источником образования зародышей служат различные твёрдые частицы: неметаллические включения, оксиды, продукты раскисления. Чем больше примесей, тем больше центров кристаллизации, тем мельче зерно. Иногда в металл специально вводят вещества, которые способствуют измельчению зерна. Эту операцию называют **модифицированием**, а специально вводимые посторонние вещества – **модификаторами**.

Модифицирование – использование специально вводимых в жидкий металл примесей (модификаторов) для получения мелкого зерна. Эти примеси, практически не изменяя химического состава сплава, вызывают при кристаллизации измельчение зерна и в итоге улучшение механических свойств.

Лекция 3. Процесс кристаллизации металлов и сплавов. Строение металлического слитка

Процесс перехода вещества из жидкого в твёрдое состояние называется **первичной кристаллизацией**. Образование новых кристаллов в твёрдом кристаллическом веществе называют **вторичной кристаллизацией**.

Кристаллизация состоит в следующем. В жидком металле атомы непрерывно движутся. По мере понижения температуры движение замедляется, атомы сближаются и группируются в кристаллы.

При соответствующем понижении температуры в жидком металле начинают образовываться кристаллики – *центры кристаллизации*, или *зародыши*. Свойства сплавов зависят от образующейся в процессе кристаллизации структуры. Процесс кристаллизации начинается с образования кристаллических зародышей – **центров кристаллизации**. Структура сплава зависит от формы, ориентировки кристаллических решёток в пространстве и скорости кристаллизации.

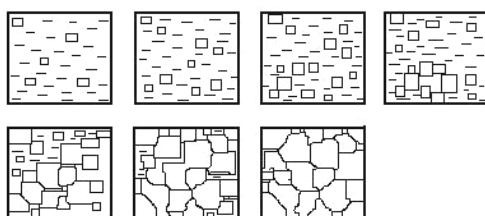


Рис. 13. Схема кристаллизации металла

Далее к этим центрам присоединяются вновь образующиеся кристаллы.

Одновременно продолжается образование новых центров. Таким образом, кристаллизация состоит из **двух стадий**: образования центров кристаллизации и роста кристаллов вокруг этих центров.

Сначала образовавшиеся кристаллы растут свободно и имеют более или менее правильную геометрическую форму. Затем при соприкосновении растущих кристаллов их правильная форма нарушается, так как в этих участках рост граней прекращается.

Для начала их роста необходимо уменьшение свободной энергии металла, в противном случае зародыш растворяется. Минимальный размер способного к росту зародыша называется *критическим размером*, а зародыш – устойчивым.

Нам известно, что все металлы в твёрдом состоянии имеют кристаллическое строение. Атомы в твёрдом металле расположены упорядоченно и образуют кристаллические решётки. Расстояния между атомами называют, как говорилось ранее, **параметрами решёток** и измеряют в нанометрах. С повышением температуры или давления параметры решёток могут изменяться. Некоторые металлы в твёрдом состоянии в различных температурных интервалах приобретают различную кристаллическую решётку, что всегда приводит к **изменению их физико-химических свойств**. Это явление носит название **полиморфизма, или аллотропии**. Перестройка кристаллических решёток при критических температурах называется **полиморфными превращениями**. Кристаллическое строение сплава более сложное, чем чистого металла, и зависит от его компонентов при кристаллизации. А, как известно из сказанного ранее, компоненты в твёрдом сплаве могут образовывать твёрдый раствор, химическое соединение и механическую смесь.

Процесс перехода из одной кристаллической формы в другую называют **аллотропическим превращением**. При аллотропических превращениях происходит изменение свойств металлов – изменение объёма металлов и растворимости углерода.

Строение металлического слитка

Кристаллы, образующиеся в процессе затвердевания металла, могут иметь различную форму в зависимости от скорости охлаждения, характера и количества примесей. Чаще в процессе кристаллизации образуются разветвлённые или древовидные кристаллы, получившие название дендритов.

Размер зерна в затвердевшем металле уменьшается с увеличением степени переохлаждения ΔT . Поскольку величина ΔT пропорциональна скорости охлаждения расплава $V_{\text{охл}}$, то измельчение зерна может быть достигнуто ускорением охлаждения расплава.

На величину зерна влияют все факторы, от которых зависит $V_{\text{охл}}$. Такими факторами являются: температуры расплава и формы, в которую он заливается, объём и конфигурация формы, теплофизические свойства материала, из которого она изготовлена, и др. С этим связано, например, одно из важнейших преимуществ литья в металлические формы (кокиль) по сравнению с литьём в песчано-глинистые формы.

Ускоренный отвод теплоты через стенки металлической формы увеличивает ΔT и, соответственно, обеспечивает получение **мелкого** зерна и более высоких механических свойств отливки.

По этой же причине размер зерна не одинаков по сечению отливки. Наиболее мелкое зерно в наружной, корковой зоне (рис. 13), где скорость охлаждения максимальная.

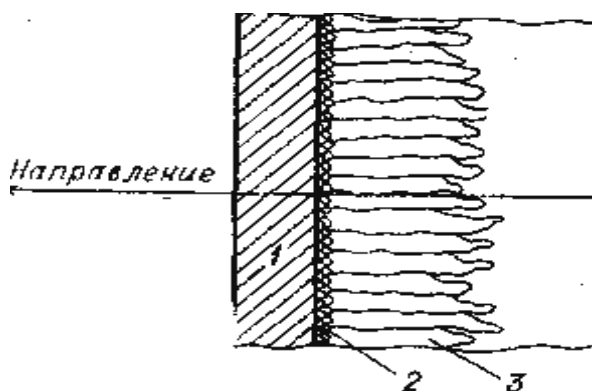


Рис. 14. Схема кристаллического строения литого металла:

1 – стенка изложницы (формы); 2 – корковая зона;

3 – зона столбчатых кристаллов

Со скоростью охлаждения связаны размеры и форма кристаллов, примыкающих к корковой зоне отливки (зона столбчатых кристаллов). Они преимущественно растут перпендикулярно стенке формы в направлении наилучшего теплоотвода. В этом направлении создаётся наибольшее переохлаждение, способствующее образованию зародышей (растёт $\propto F$), а скорость роста достаточно высока, так как температура расплава и скорость диффузии повышаются от поверхности к центру отливки.

Поэтому и получаются крупные вытянутые кристаллы. В массивных отливках возможно появление и третьей зоны крупных равноосных кристаллов в центре отливки, где металл, равномерно остывая, затвердевает в последнюю очередь.

Рассмотрим реальный процесс получения стального слитка. Стальные слитки получают охлаждением в металлических формах (изложницах) или на установках непрерывной разливки. В изложнице сталь не может затвердеть одновременно во всём объёме из-за невозможности создания равномерной скорости отвода тепла. Поэтому процесс кристаллизации стали начинается у холодных стенок и дна изложницы, а затем распространяется внутрь жидкого металла.

При соприкосновении жидкого металла со стенками изложницы (рис. 15) в начальный момент образуется зона **мелких равноосных кристаллов 1**. Так как объём твёрдого металла меньше жидкого, между стенкой изложницы и застывшим металлом образуется воздушная

прослойка и сама стенка нагревается от соприкосновения с металлом. Поэтому скорость охлаждения металла снижается, и кристаллы растут в направлении отвода теплоты. При этом образуется зона **2**, состоящая из древовидных или **столбчатых кристаллов**.

В процессе дальнейшей кристаллизации направленность отвода

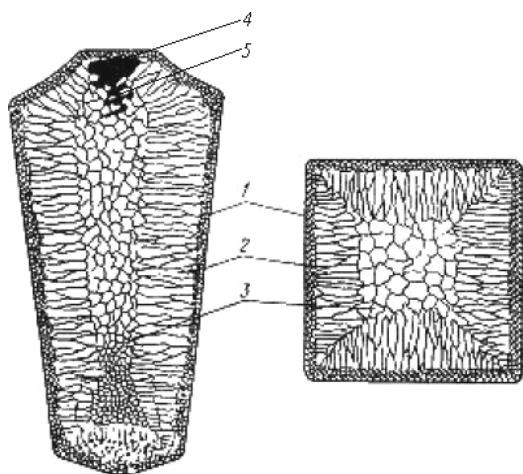


Рис. 15. Строение
стального слитка

теплоты теряется, скорость охлаждения значительно уменьшается, поэтому в центральной части слитка образуются крупные равноосные кристаллы. Во внутренней зоне слитка **3** образуются **равноосные, неориентированные** кристаллы **больших размеров** в результате замедленного охлаждения.

В верхней части слитка, которая затвердевает в последнюю очередь, образуется **усадочная раковина 4**, вследствие уменьшения объёма металла при охлаждении.

Жидкий металл имеет больший удельный объём, чем твёрдый, поэтому в верхней части слитка, которая застывает в последнюю очередь, образуется полость вследствие уменьшения объёма металла при охлаждении – **усадочная раковина 4**, обычно окружённая наиболее загрязнённой частью металла. Верхнюю часть слитка отрезают и переплавляют, а остальной металл подвергают обработке давлением. Под усадочной раковиной металл в зоне **5** получается рыхлым из-за большого количества **усадочных пор, газовых пузырей**. Для получения изделий используют только часть слитка, удаляя усадочную раковину и рыхлый металл слитка для последующего переплава.

Кристаллы в процессе затвердевания металла могут иметь различную форму в зависимости от скорости охлаждения, характера и количества примесей. Форма растущих кристаллов определяется не только условиями их касания друг с другом, но и составом сплава, наличием примесей и режимом охлаждения. Чаще всего в процессе кристаллизации образуются разветвлённые или древовидные кристаллы, получившие название дендритов.

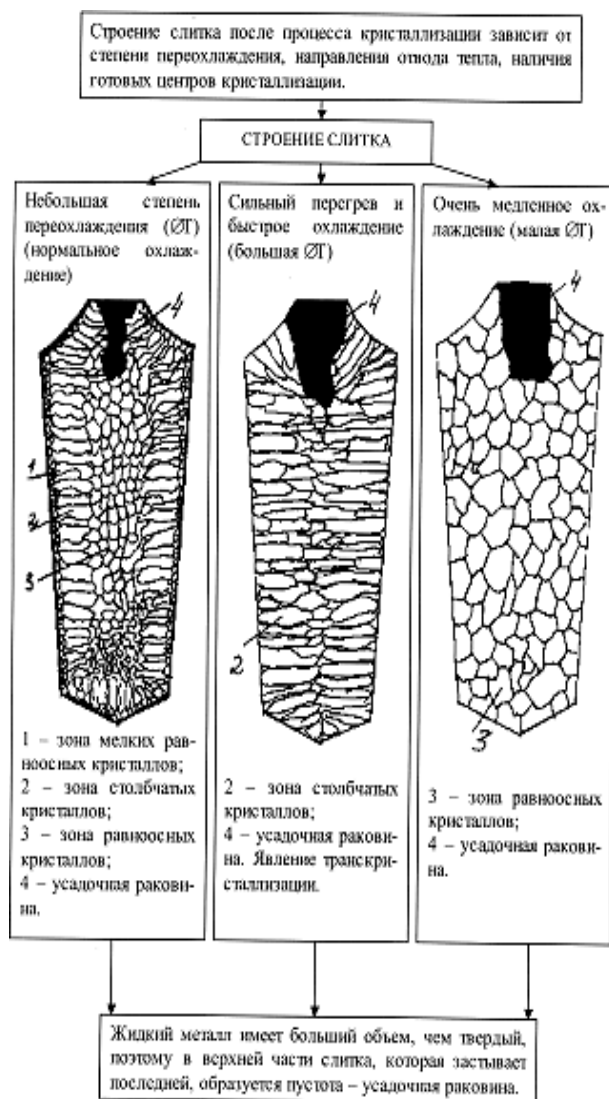


Рис. 16. Схема строения слитка

Рост кристаллов во второй зоне имеет направленный характер. Они растут перпендикулярно стенкам изложницы, образуются древовидные кристаллы – дендриты (рис. 16). Растут дендриты с направлением, близким к направлению теплоотвода. Зоны столбчатых кристаллов в процессе кристаллизации стыкуются, это явление называется **транскристаллизацией**.

По мере кристаллизации металла примеси оттесняются в жидкую часть. Это предопределяет неравномерное распределение элементов как в микрообъеме, так и в различных зонах слитка. Процесс изменения химического состава металла по сечению литой заготовки, появление неоднородности по химическому составу в различных частях **отливки называется ликвацией**.

В **сплавах** различают два основных вида **ликвации**:

- **внутрикристаллическую**, когда неоднородность охватывает зёрна **металла**;
- **зональную**, когда различные зоны отливки имеют различный химический состав. Она отрицательно влияет на механические свойства металла.

На ликвацию оказывают значительное влияние химический состав **сплава** и скорость остывания отливки. Чем крупнее отливка, тем медленнее происходит охлаждение и тем больше развивается зональная ликвация. В тонкостенных отливках зональная ликвация развита меньше. При сочетании в литой конструкции тонких и толстых стенок ликвационные включения концентрируются в толстых частях отливок.

Поэтому при **конструировании литых деталей** необходимо изготавливать их с равномерной толщиной стенок или конструировать по принципу направленного затвердевания так, чтобы отливка затвердела снизу вверх. В этом случае ликвидирующие примеси скапливаются в прибыли, затвердевающей в последнюю очередь.

Ликвация представляет собой свойство сплавов распадаться при переходе из жидкого в твёрдое состояние на составные части или отдельные соединения, которые имеют различные точки плавления. Металлы вообще сплавляются, т.е. растворяются одни в других. Одни из них, например золото и медь, сплавляются в различных пропорциях и на вид представляют однородное тело; другие же, например свинец и цинк, разделяются при медленном охлаждении. В случае ликвации при застывании жидкого металла выделяются и затвердевают сперва самые тугоплавкие тела, затем менее тугоплавкие и, наконец, самые легкоплавкие.

Чистые металлы обладают низкой прочностью, они слишком пластичны и поэтому практически не используются. Обычно используют сплавы разных металлов, в качестве добавок используют и неметаллы.

Для изучения процессов, происходящих в сплавах при их превращениях, а также для описания строения сплавов в металловедении используют понятия: **система, компонент, фаза**.

Сплавы – это сложные вещества, полученные сплавлением двух и более элементов. Элементами могут быть как металлы, так и неметаллы. Эти элементы называются компонентами сплава. **Компонент** – вещество, образующее систему-сплав. Сплав имеет более сложное строение, чем его компоненты. Особенности строения структуры сплава зависят от характера взаимодействия компонентов. Составляющие сплав компоненты могут вступать в химическое взаимодей-

ствие, образуя химическое соединение, или взаимно растворяться друг в друге, образуя растворы. Кроме того, часто сплавы представляют собой механическую смесь зёрен веществ, образующих сплав.

В зависимости от физико-механического взаимодействия компонентов в сплавах образуются различные фазы.

Фазой называют однородную часть системы, имеющую одинаковый состав, одно и то же агрегатное состояние и отделённую от остальных частей системы поверхностью раздела, при переходе через которую химический состав или структура вещества изменяются скачкообразно.

Совокупность фаз, находящихся в равновесии при определённых внешних условиях (давлении, температуре), называют **системой**. Например, однородная жидкость (расплавленный металл) является **однофазной системой**, при кристаллизации чистого металла система состоит из двух фаз: жидкой (расплавленный металл) и твёрдой (зёрна закристаллизовавшегося металла). Другой пример: механическая смесь двух видов кристаллов **образует двухфазную систему**, так как каждый кристалл отличен по составу или строению и отделён один от другого поверхностью раздела. Сплав называют **однородным** (гомогенным), если его структура однофазна, и **разнородным** (гетерогенным), если его структура состоит из нескольких фаз. Под **структурой** сплава понимают видимое в микроскоп взаимное расположение фаз, их форму и размеры. Компоненты в сплавах могут составлять жидкие и твёрдые растворы, химические соединения и механические смеси.

Компонентами могут быть металлы и неметаллы, а также устойчивые, т.е. не диссоциирующие на составные части в рассматриваемых интервалах температур вещества – химические соединения. Так, для цветных металлических сплавов компонентами могут быть металлы (например, медь с цинком образует латунь), а для черных – металлы с небольшим содержанием неметаллов (железо с углеродом – чугун, сталь).

Строение сплавов более сложно, чем строение чистого металла. В сплаве могут наблюдаться зерна чистых и других компонентов, **твёрдых** растворов и химических соединений. Чистый металл представляет собой однокомпонентную систему, сплав двух металлов – двухкомпонентную систему и т.д. В сплаве кроме основных компонентов содержатся и примеси. Примеси бывают полезные, улучшающие свойства сплава, и вредные, ухудшающие его свойства. Примеси бывают случайные, попадающие в сплав при его приготовлении, и специальные, которые вводят для придания ему требуемых свойств.

Металлическим сплавом называют сплав, приготовленный преимущественно из металлических элементов и обладающий металлическими свойствами. Например, мягкая медь с добавлением олова превращается в более твёрдую бронзу. При этом улучшаются эксплуатационные и технологические свойства металлического материала.

Необходимое условие существования сплава – растворимость компонентов в жидкой фазе хотя бы частично.

Возможны и другие способы приготовления сплавов: спекания, электролиз, возгонка. В этом случае вещества называют **псевдосплавами**.

Сплав имеет более сложное строение, чем его компоненты.

Строение металлического сплава зависит от того, в какие взаимодействия вступают компоненты, составляющие сплав. Почти все металлы в жидком состоянии растворяются друг в друге в любых соотношениях. При образовании сплавов в процессе их затвердевания возможно различное взаимодействие компонентов. Составляющие сплав компоненты могут вступать в химическое взаимодействие, образуя химическое соединение, или взаимно растворяться друг в друге, образуя растворы.

В зависимости от характера взаимодействия компонентов различают сплавы: 1) твёрдые растворы; 2) химические соединения; 3) механические смеси.

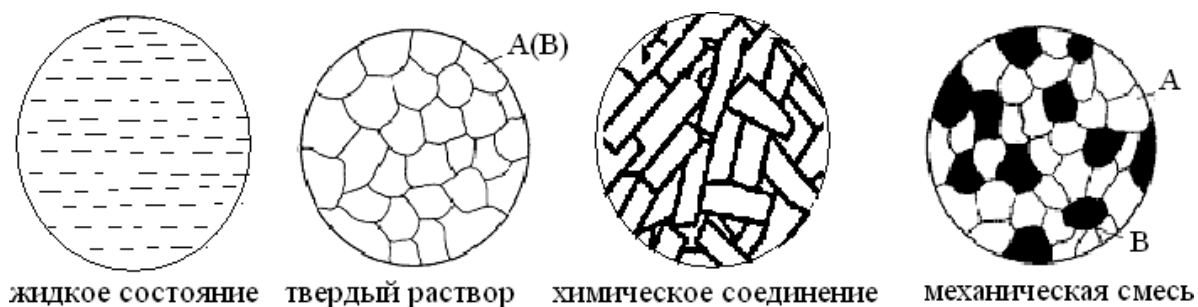


Рис. 17. Микроструктура сплава

Твёрдыми растворами называют сплав, у которого компоненты сплава взаимно растворяются один в другом. В твёрдом растворе один из входящих в состав сплава компонентов сохраняет присущую ему кристаллическую решётку, а второй компонент в виде отдельных атомов распределяется внутри кристаллической решётки.

Твёрдые растворы разделяются на три типа: **замещения, внедрения и вычитания**. Независимо от типа твёрдые растворы однофазны.

Химическое соединение – компоненты сплава вступают в химическое взаимодействие, при этом образуется новая кристаллическая решётка. Компоненты имеют определённое соотношение по массе.

Механическая смесь – компоненты сплава обладают полной взаимной нерастворимостью и имеют различные кристаллические решётки. При этих условиях сплав будет состоять из смеси кристаллов составляющих его компонентов и представлять собой смесь двух типов кристаллов – веществ А и В, отчётливо видимых на микроструктуре (рис. 17).

Свойства сплавов зависят от образующейся в процессе кристаллизации структуры. Процесс кристаллизации начинается с образования кристаллических зародышей – **центров кристаллизации**. Структура сплава зависит от формы, ориентировки кристаллических решёток в пространстве и скорости кристаллизации.

Металлы и сплавы являются важнейшими конструкционными материалами, широко применяющимися в технике. Металлам, кроме блеска и пластичности, присущи высокие теплопроводность и электропроводность.

Получение химически чистых металлов связано со значительными трудностями, а значения их механических характеристик не высоки. В связи с этим в технике повсеместно используются сплавы металлов.

Так как сплавы получают обычно по металлургической технологии, твёрдому состоянию предшествует жидкое.

Кристаллизация сплавов подчиняется тем же закономерностям, что и кристаллизация чистых металлов. Необходимым условием является стремление системы в состояние с минимумом свободной энергии. Основным отличием является большая роль диффузионных* процессов между жидкостью и кристаллизующейся фазой. Эти процессы необходимы для перераспределения разнородных атомов, равномерно распределённых в жидкой фазе.

Под диффузией понимают перемещение атомов в кристаллическом теле на расстояния, превышающие средние межатомные расстояния данного вещества. Если перемещения атомов не связаны с изменением концентрации в отдельных объёмах, то такой процесс называется самодиффузией. Перемещение атомов, сопровождающееся изменением концентрации, происходит в сплавах или металлах с повышенным содержанием примесей и называется диффузией, или гетеродиффузией.

* Диффузия – рассеивание, процесс переноса материи или энергии из области с высокой концентрацией в область с низкой (чернила и жидкость-окрашивание).

В сплавах в твёрдых состояниях, имеют место процессы перекристаллизации, обусловленные аллотропическими превращениями компонентов сплава, распадом твёрдых растворов, выделением из твёрдых растворов вторичных фаз, когда растворимость компонентов в твёрдом состоянии меняется с изменением температуры.

Эти превращения называют фазовыми превращениями в твёрдом состоянии. При перекристаллизации в твёрдом состоянии образуются центры кристаллизации и происходит их рост.

Обычно центры кристаллизации возникают по границам зёрен старой фазы, где решётка имеет наиболее дефектное строение и где имеются примеси, которые могут стать центрами новых кристаллов. У старой и новой фазы в течение некоторого времени имеются общие плоскости. Такая связь решёток называется когерентной связью. В случае различия строения старой и новой фаз превращение протекает с образованием промежуточных фаз. Нарушение когерентности и обособления кристаллов наступает, когда они приобретут определённые размеры. Процессы кристаллизации сплавов изучаются по диаграммам состояния.

Итак, свойства сплавов (данного химического состава) определяются их структурой. Чтобы прогнозировать свойства какого-либо сплава, нужно знать его структуру.

ТЕМА 2. ПОНЯТИЕ О ДИАГРАММАХ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение состояния сплава в зависимости от состава, его температуры, давления. Диаграмму состояния показывают устойчивые, равновесные состояния сплава, обладающие при данных условиях минимальной свободной энергией. Поэтому диаграмму иногда называют диаграммой фазового равновесия.

Лекция 4. Диаграмма состояния

Структуру сплавов различного химического состава можно установить путём анализа соответствующих диаграмм фазового равновесия или диаграмм состояния.

Под состоянием понимают наличие тех или иных фаз в сплаве данного химического состава при данной температуре. То есть диаграммы состояния строятся в координатах «температура – химический состав сплавов системы А–В».

Линии диаграмм состояния – это линии фазовых превращений («критические линии»), при пересечении которых фазовый состав (структура) сплавов обязательно изменяется. Умение анализировать диаграммы состояния является важной частью освоения курса материаловедения.

Построение диаграмм состояния наиболее часто осуществляется при помощи термического анализа. В результате получают серию кривых охлаждения, на которых при температурах фазовых превращений наблюдаются точки перегиба и температурные остановки.

Температуры, при которых изменяется строение металлов и сплавов, **называют критическими точками**. При плавлении и затвердевании чистые металлы имеют одну критическую точку, а сплавы – две. В интервале между этими точками в сплавах существуют две фазы – жидкий сплав и кристаллы.

Некоторые критические точки имеют названия, например, точки, отвечающие началу кристаллизации, называют точками **ликвидус**, а концу кристаллизации – точками **солидус**.

При сплавлении железа с углеродом (C) образуется карбид железа Fe_3C , называемый цементитом, он содержит 6,67 % C.

Промышленные сплавы железа с углеродом содержат до $\approx 4\%$ C, поэтому их структуру изучают с помощью диаграммы состояния «Железо – цементит» (Fe–Ц), т.е. компонентами данной системы являются Fe и Fe_3C (рис. 7). На этом рисунке обозначены фазы во всех областях диаграммы, а под рисунком указаны структуры сплавов с различным содержанием углерода при нормальных температурах.

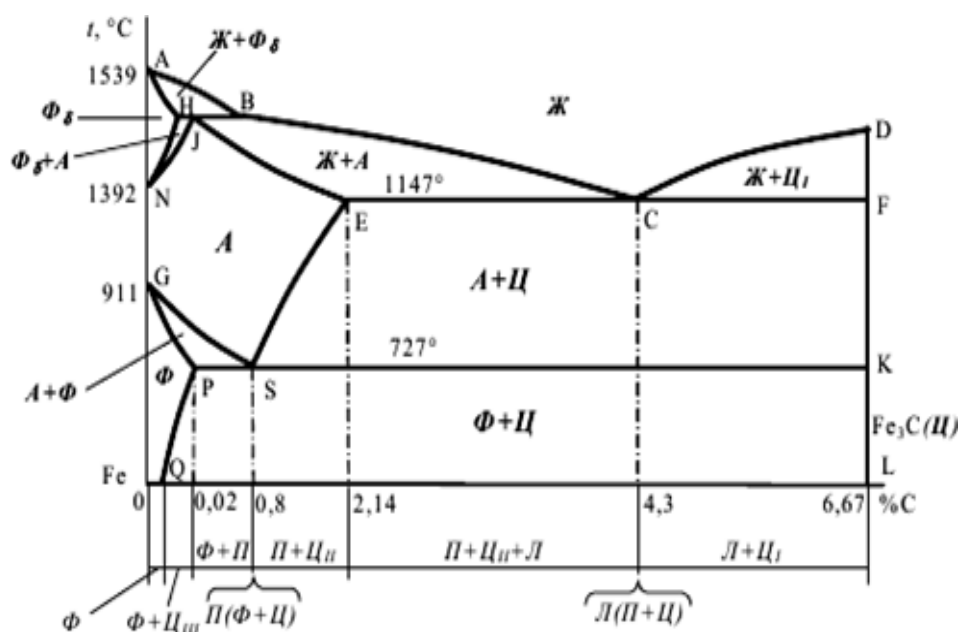


Рис. 18. Диаграмма состояния «железо – цементит»:

внизу под диаграммой – обозначения структур сплавов с различным содержанием углерода при нормальных температурах

Значение диаграммы «железо – цементит» состоит в том, что она позволяет объяснить зависимость структуры и, соответственно, свойств сталей и чугунов от содержания углерода и определить режимы термической обработки для изменения свойств сталей.

На диаграммах состояния верхняя система линий (в данном случае ABCD) называется линией ликвидус (лат. – жидкий), выше неё любой сплав находится в жидком состоянии. На рис. 18Ж – жидкая фаза (расплав) – жидкий раствор С в Fe. Система линий диаграммы непосредственно под ликвидусом (в данном случае АНЕССF) называется линией солидус (лат. – твёрдый), ниже неё любой сплав – в твёрдом состоянии.

В системе Fe-Fe₃C существуют три твёрдые (кристаллические) фазы: цементит – химическое соединение (на диаграмме его однофазная «область» – линия – DFKL) и твёрдые растворы С в Fe – аустенит (область GNJES) и феррит (0GPQ). Наличие двух твёрдых растворов является следствием полиморфизма железа – его способности существовать в двух модификациях (α и γ) при различных температурах. В интервале температур 0...911 °С, а также 1392...1539 °С – это α –Fe (или Fe α) с ОЦК решёткой, в интервале 911...1392 °С железо имеет ГЦК решётку – это γ –Fe (или Fe γ).

Соответственно, при сплавлении железа с углеродом образуются два твёрдых раствора внедрения С в Fe: феррит (Ф) – раствор С в α –Fe и аустенит (А) – раствор С в γ –Fe.

Из диаграммы Fe–Ц (рис. 18) видно, что окончательная структура (при нормальных температурах) практически всех сплавов (правее т. Q, т.е. >0,01 % С) формируется из двух фаз: Ф и Ц.

Феррит – твёрдый раствор на основе α –Fe, содержащий < 0,02 % С, очень мягкая (твёрдость HB \leq 800) и пластичная (относительное удлинение $\delta \geq 30$ %) фаза.

Цементит – карбид железа, напротив, очень твёрд (HB \approx 8000) и хрупок ($\delta \approx 0$ %). Такие характеристики Ф и Ц обуславливают существенную зависимость механических свойств железоуглеродистых сплавов от содержания С.

Ледебурит – структурная составляющая железоуглеродистых сплавов, главным образом чугунов, представляющая собой эвтектическую смесь аустенита и цементита, образующаяся в точке С (1130°) диаграммы состояния железо – углерод. При охлаждении ниже точки А (723° для чистых железоуглеродистых сплавов) аустенит, входящий в состав ледебурита, превращается в перлит; следовательно, при нормальной температуре ледебурит состоит из перлита и цементита.

Перлит – одна из структурных составляющих железоуглеродистых сплавов – сталей и чугунов: представляет собой эвтектоидную смесь двух фаз – феррита и цементита (в легированных сталях – карбидов).

Аустенит – высокотемпературная гранецентрированная модификация железа и его сплавов. В углеродистых сталях аустенит – это твёрдый раствор внедрения, в котором атомы углерода входят внутрь элементарной ячейки γ -железа во время конечной термообработки.

Чтобы установить структуру сплава, нужно проследить, какие превращения происходят в нём при медленном охлаждении из жидкого состояния до комнатной температуры.

Рассмотрим этот процесс на примере сталей – сплавов с содержанием углерода от 0,02 до 2,14 % С.

Формирование равновесной структуры углеродистых сталей в процессе кристаллизации

Из диаграммы Fe–Ц (рис. 18) следует, что все стали в результате затвердевания (т.е. непосредственно ниже линии солидус NJBE) приобретают однофазную аустенитную структуру (А).

Видно также, что при дальнейшем охлаждении они пересекают ряд линий диаграммы, значит, в них происходят превращения в твёрдом состоянии. Эти превращения вызваны явлением полиморфизма железоуглеродистых сплавов (а также уменьшением растворимости С в А (линия ES) и Ф (линия PQ) с понижением температуры). Как следует из диаграммы Fe–Ц, эти превращения в сталях заканчиваются на линии PSK (727 °С), т.к. ниже этой температуры какие-либо критические линии отсутствуют.

На примере стали, содержащей 0,8 % С (т. S), видно, что превращение, происходящее при $T \leq 727$ °С, заключается в распаде аустенита на смесь феррита и цементита:



где индексы S и P показывают содержание С в аустените и феррите соответственно (в цементите оно не указывается, т.к. при любой температуре равно 6,67 % С).

Такое превращение, когда при постоянной температуре из одной твёрдой фазы образуются две другие (при фиксированных составах фаз), называется эвтектоидным.

В железоуглеродистых сплавах эвтектоидное превращение называется перлитным, поскольку в результате него образуется перлит – чередующаяся смесь тонких кристаллов (пластинок) феррита и цементита – структура, напоминающая перламутровый (жемчужный) узор раковин.

В зависимости от содержания C углеродистые стали делятся на доэвтектоидные ($0,02 \dots 0,8 \% C$), эвтектоидные ($\approx 0,8 \% C$), заэвтектоидные ($0,8 \dots 2,14 \% C$).

Из приведённого выше обсуждения очевидно, что равновесная структура эвтектоидной стали – перлит (рис. 19в).

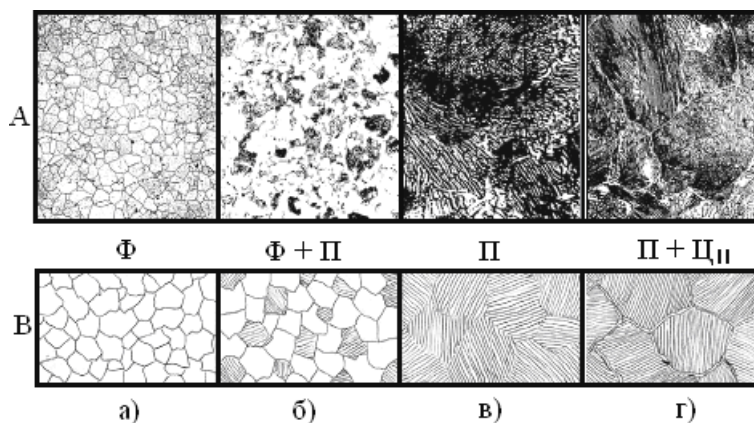


Рис. 19. Структура технического железа (а), доэвтектоидной (б), эвтектоидной (в), заэвтектоидной (г) сталей

В доэвтектоидных сталях помимо перлита (Π) в структуре содержатся кристаллы избыточного феррита, образовавшиеся из аустенита при охлаждении между линиями GS и PS (рис. 19б).

В заэвтектоидных сталях перлитному превращению предшествует выделение вторичного цементита (Ц_{II}) из аустенита, поскольку предельное содержание C в A уменьшается с понижением температуры (по линии ES). Поэтому структура заэвтектоидных сталей состоит из зёрен перлита, разделённых сеткой кристаллов Ц_{II} (рис. 19г).

Таким образом, основной структурной составляющей углеродистых сталей в равновесном состоянии является перлит (рис. 19). Эвтектоидная сталь содержит одну структурную составляющую (Π), все остальные стали – по две: доэвтектоидные – $\Pi + \Phi$, заэвтектоидные – $\Pi + \text{Ц}_{II}$.

В сплавах, содержащих $< 0,02 \% C$ (левее т. P (рис. 19)), перлит в структуре отсутствует, т.к. в процессе охлаждения они не пересекают линию перлитного превращения (PSK). Эти сплавы называются техническим железом в отличие от химически чистого Fe , представленного на диаграмме $Fe - C$ вертикалью $ANG0$). Структура технического Fe – феррит (хотя в сплавах, содержащих $0,01 \dots 0,02 \% C$ присутствует небольшое количество третичного цементита – Ц_{III}).

Заметим, что, несмотря на разнообразие структур (обусловленное тем, что сплавы с разным содержанием углерода пересекают при охлаждении различные линии диаграммы Fe – Ц), фазовый состав сплавов, содержащих $>0,01\%$ С, одинаков – $\Phi + \text{Ц}$.

Для экспериментального построения диаграммы состояния сплавов, образованных компонентами А и В, необходимо изготовить серию сплавов с различным содержанием этих компонентов. Для каждого сплава экспериментально определяют критические точки, т.е. температуры фазовых превращений. Одна из простейших диаграмм приведена на рисунке 20.

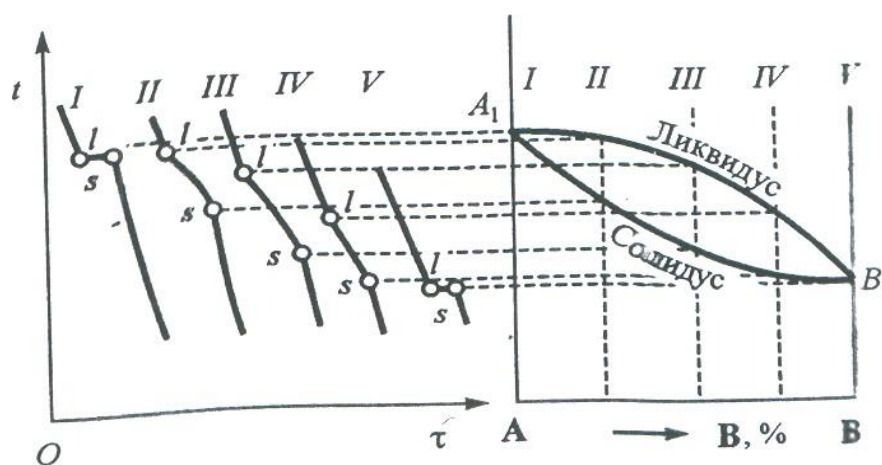


Рис. 20. Схема построения диаграммы состояния

Полученные значения температуры откладывают на вертикальных линиях в соответствии с химическим составом сплавов. Соединяя критические точки, получают линии диаграммы состояния.

Диаграммы состояния показывают устойчивые состояния, т.е. состояния, которые при данных условиях обладают минимумом свободной энергии, и поэтому её также называют диаграммой равновесия, так как она показывает, какие при данных условиях существуют равновесные фазы.

Построение диаграмм состояния наиболее часто осуществляется при помощи термического анализа. В результате получают серию кривых охлаждения, на которых при температурах фазовых превращений наблюдаются точки перегиба и температурные остановки.

По диаграмме состояния можно определить температуры фазовых превращений, изменение фазового состава, приблизительно, свойства сплава, виды обработки, которые можно применять для сплава.

Диаграмма состояния и кривые охлаждения сплавов системы представлены на рисунке 21.

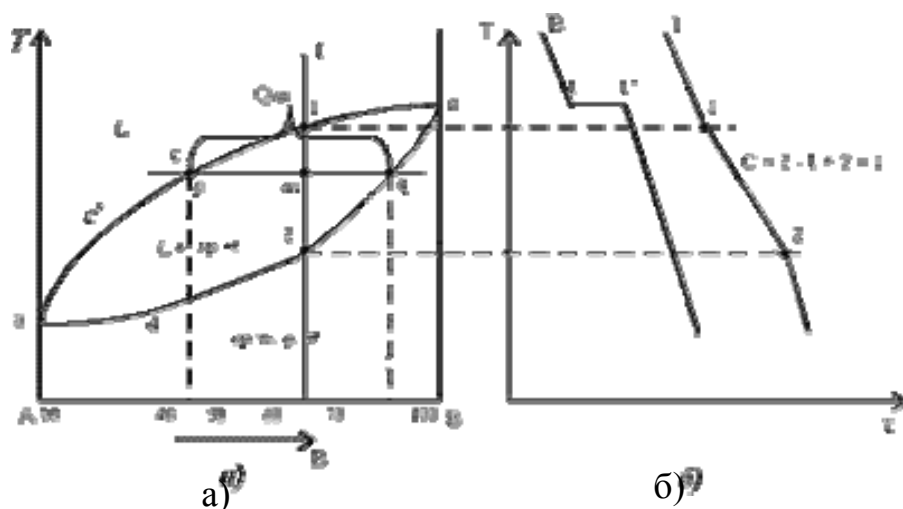


Рис. 21. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твёрдом состоянии (а); кривые охлаждения типичных сплавов (б)

Сначала получают термические кривые. Полученные точки переносят на диаграмму, соединив точки начала кристаллизации сплавов и точки конца кристаллизации, получают диаграмму состояния.

Проведём анализ полученной диаграммы.

1. Количество компонентов: $K = 2$ (компоненты А и В).
2. Число фаз: $f = 2$ (жидкая фаза L, кристаллы твёрдого раствора α).
3. Основные линии диаграммы:
 - acb – линия ликвидус, выше этой линии сплавы находятся в жидком состоянии;
 - adb – линия солидус, ниже этой линии сплавы находятся в твёрдом состоянии.

4. Характерные сплавы системы:

Чистые компоненты А и В кристаллизуются при постоянной температуре, кривая охлаждения компонента В представлена на рисунке 21б.

Процесс кристаллизации сплава I: до точки 1 охлаждается сплав в жидком состоянии. При температуре, соответствующей точке 1, начинают образовываться центры кристаллизации твёрдого раствора α . На кривой охлаждения отмечается перегиб (критическая точка), связанный с уменьшением скорости охлаждения вследствие выделения скрытой теплоты кристаллизации. На участке 1–2 идёт процесс кри-

сталлизации, протекающий при понижающейся температуре, так как согласно правилу фаз в двухкомпонентной системе при наличии двух фаз (жидкой и кристаллов твёрдого раствора α) число степеней свободы будет равно единице ($C=2-2+1=1$). При достижении температуры соответствующей точке 2, сплав затвердевает, при дальнейшем понижении температуры охлаждается сплав в твёрдом состоянии, состоящий из однородных кристаллов твёрдого раствора α .

По перегибам и остановкам на кривых охлаждения определяют критические температуры и критические точки сплава. **Критической** называется **температура**, при которой происходит изменение в строении, а значит, и в свойствах металлов и сплавов. При критических температурах кривые охлаждения резко изменяют свой характер.

Критическими точками называются точки перегиба на кривых охлаждения. **Комплекс линий**, объединяющих критические точки сплавов, в зависимости от химического состава сплава и его температуры представляет собой **диаграмму состояния**.

При кристаллизации железоуглеродистых сплавов образуются следующие структурные составляющие: **аустенит, феррит, цементит, перлит, ледебурит**. **Аустенит** – твёрдый раствор углерода в железе. Сплавы с содержанием углерода до 2 % (стали) при высоких температурах (выше 723 °C) имеют структуру чистого аустенита (на диаграмме это область AESG). Кристаллическая решётка аустенита гранецентрированный куб. При нормальной температуре (18–24 °C) аустенит в простых железоуглеродистых сплавах увидеть нельзя. Аустенит, обладающий высокой пластичностью и низкой твёрдостью (HB170-200), хорошо поддаётся горячей обработке давлением (ковке, штамповке и прокатке). На диаграмме аустенит обозначается буквой А.

Диаграммы состояния сплавов дают возможность правильно выбрать сплав, характеризуют его поведение при обработке, физические и механические свойства. Существуют различные типы диаграмм состояния в зависимости от числа компонентов и строения сплава. Рассмотрим диаграммы состояния сплавов из двух компонентов: свинец-сурьма, алюминий-кремний, медь-никель и др.

Диаграмма состояния 1-го рода характеризует сплавы (например, свинца с сурьмой), у которых компоненты в жидком виде полностью растворимы, а в твёрдом образуют механическую смесь. Для построения этой диаграммы выбирают три-четыре сплава различной концентрации, перенасыщенных либо свинцом, либо сурьмой, и на вспомогательной диаграмме температура-время (рис. 8 слева) наносят,

пользуясь данными наблюдений температуры кристаллизации чистого свинца и чистой сурьмы, а также нижеперечисленных сплавов: 1) 95 % Рв; 5 % Sb; 2) 90 % Рв; 10 % Sb; 3) 87 % Рв; 13 % Sb; 4) 60 % Рв; 40 % Sb. Вначале вычерчивают кривые кристаллизации Рв и Sb (1 и 6). Свинец кристаллизуется при 327 °С, сурьма – при 631 °С. Их кристаллизация отмечена горизонтальным участком кривой.

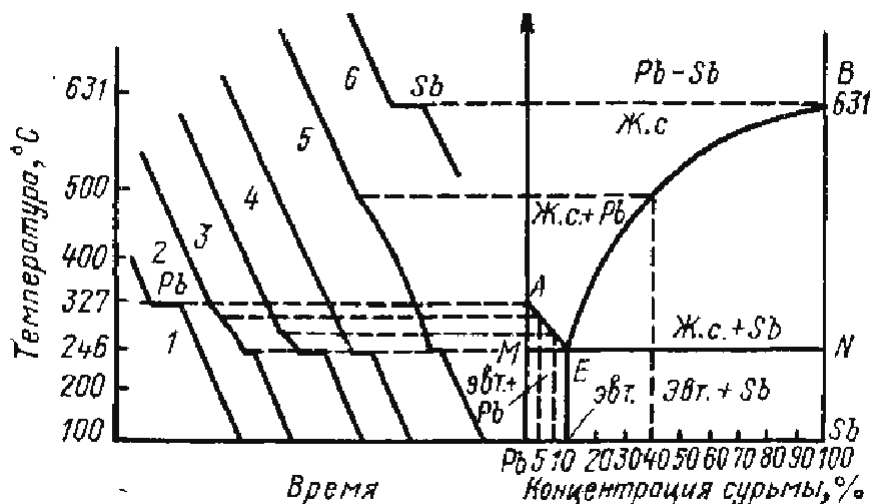


Рис. 22. Диаграмма состояния сплавов свинец – сурьма когда концентрация сурьмы достигает 13 %

Первый сплав (кривая 2) начинает кристаллизоваться при 300 °С с выделением избыточных кристаллов свинца. Оставшаяся часть сплава бедна свинцом, значит, концентрация сурьмы в ней возрастает, и, когда она достигает 13 %, при 246 °С происходит окончательная кристаллизация (см. горизонтальный участок кривой). Второй сплав (кривая 3) кристаллизуется аналогично первому, но точка начала кристаллизации у него ниже, а кончается кристаллизация также при 246 °С.

Третий сплав (кривая 4) кристаллизуется полностью при одной температуре (246 °С) с одновременным выпадением кристаллов свинца и сурьмы. Четвёртый сплав (кривая 5) начинает кристаллизоваться при 480 °С с выделением избыточных кристаллов сурьмы. В жидком сплаве сурьмы становится всё меньше, и, когда её содержание снизится до 13 %, при 246 °С произойдёт окончательная кристаллизация. Все точки начала и конца кристаллизации свинца, сурьмы и указанных четырёх сплавов перенесём на основную диаграмму. Соединив все точки начала кристаллизации, получают линию АЕВ. Эта линия называется ликвидусом. Все сплавы, лежащие выше ликвидуса, нахо-

дятся в жидком состоянии. Линия MEN называется солидусом. Ниже этой линии все сплавы находятся в твёрдом состоянии. В интервале между ликвидусом и солидусом имеются две фазы: жидкий сплав (ж. с.) и кристаллы одного из компонентов. В области МАЕ – жидкий сплав и кристаллы свинца, а в области EBN – жидкий сплав и кристаллы сурьмы. Сплав, содержащий 13 % сурьмы, кристаллизующийся при одной температуре, называется **эвтектическим**. Он имеет самую низкую температуру кристаллизации и отличается равномерной структурой. Сплавы, содержащие менее 13 % сурьмы, лежащие влево от эвтектики, называются **доэвтектическими**, а более 13 % сурьмы – **заэвтектическими**. Структуры эвтектического, доэвтектического и заэвтектического сплавов сильно различаются между собой. **Эвтектика** – структура с равномерно распределёнными компонентами. В доэвтектических сплавах наряду с эвтектикой имеются кристаллы свинца, в заэвтектических – наряду с эвтектикой кристаллы сурьмы. Различие структур определяет различие свойств, сплавов. Для определения состояния сплава при любой температуре и нахождения точек кристаллизации с помощью диаграммы нужно из точки концентрации данного сплава восстановить перпендикуляр до пересечения с линиями ликвидуса и солидуса. Точки пересечения перпендикуляра укажут начало и конец кристаллизации. Практическое применение диаграммы свинец – сурьма находят, например, при выборе подшипникового сплава. Пользуясь этой диаграммой, установили, что наиболее пригодными для подшипниковых сплавов являются заэвтектические сплавы, состоящие из мягкой эвтектики и твёрдых вкраплений сурьмы. Мягкая основа несколько изнашивается, а твёрдые кристаллы сурьмы сохраняются, и поэтому в микроуглублениях мягкой основы хорошо удерживается смазка. Наиболее подходящими сплавами для подшипников из всех заэвтектических оказались сплавы с содержанием 15–20 % Sb, так как температуры кристаллизации (плавления) этих сплавов (340–360 °С) соответствуют температурам, при которых происходит заливка подшипников.

Лекция 5. Термическая и химико-термическая обработка стали.

Отжиг

Термической обработкой называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твёрдых металлических сплавов с целью получения заданных свойств за счёт изменения внутреннего строения и структуры. Различают следующие виды термической обработки: отжиг, закалка и отпуск.

Отжигом стали называется вид термической обработки, заключающийся в её нагреве до определённой температуры, выдержке при этой температуре и медленном охлаждении. Цели отжига – снижение твёрдости и улучшение обрабатываемости стали, изменение формы и величины зерна, выравнивание химического состава, снятие внутренних напряжений. Существуют различные виды отжига: полный, неполный, диффузионный, рекристаллизационный, низкий, отжиг на зернистый перлит, нормализация. Температуры нагрева стали для ряда видов отжига связаны с положением линий диаграммы Fe-Fe₃C. Низкая скорость охлаждения обычно достигается при остывании стали вместе с печью. Полный отжиг применяется для доэвтектоидных сталей. Нагрев стали для полного отжига осуществляется на 30...50 °С выше линии GS диаграммы Fe-Fe₃C (рис. 23). При этом происходит полная перекристаллизация стали и уменьшение величины зерна. Исходная структура из крупных зёрен феррита и перлита при нагреве превращается в аустенитную, а затем при медленном охлаждении – в структуру из мелких зёрен феррита и перлита. Повышение температуры нагрева привело бы к росту зерна. При полном отжиге снижается твёрдость и прочность стали, а пластичность повышается. При неполном отжиге нагрев производится на 30...50 °С выше линии PSK диаграммы Fe-Fe₃C (рис. 23). Он производится, если исходная структура не очень крупнозерниста или не надо изменить расположение ферритной (в доэвтектоидных сталях) или цементитной (в заэвтектоидных сталях) составляющей. При этом происходит лишь частичная перекристаллизация – только перлитной составляющей стали.

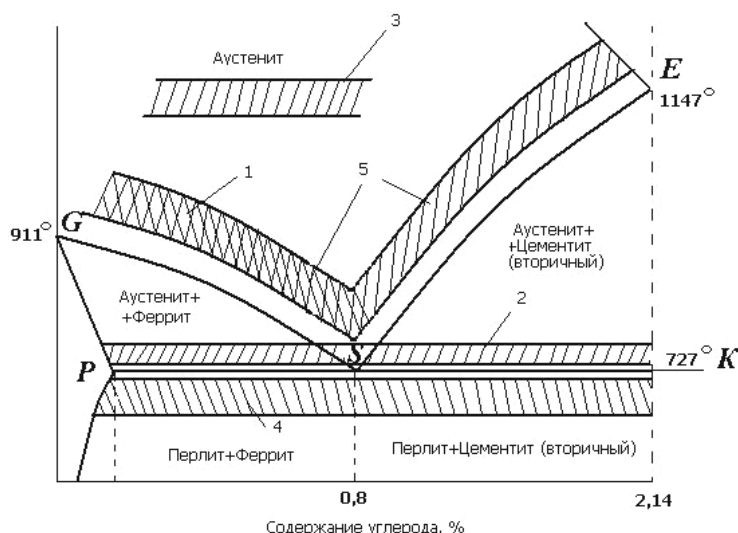


Рис. 23. Области температур для различных видов отжига:
 1 – полный отжиг; 2 – неполный отжиг; 3 – диффузионный отжиг;
 4 – рекристаллизационный отжиг; 5 – нормализация

Диффузионный отжиг (гомогенизация) заключается в нагреве стали до 1000...1100 °С, длительной выдержке (10...15 часов) при этой температуре и последующем медленном охлаждении. В результате диффузионного отжига происходит выравнивание неоднородности стали по химическому составу. Благодаря высокой температуре нагрева и продолжительной выдержке получается крупнозернистая структура, которая может быть устранена последующим полным отжигом.

Рекристаллизационный отжиг предназначен для снятия наклёпа и внутренних напряжений после холодной деформации и подготовки структуры к дальнейшему деформированию. Нагрев необходимо осуществлять выше температуры рекристаллизации, которая для железа составляет 450 °С. Обычно для повышения скорости рекристаллизационных процессов применяют значительно более высокие температуры, которые, однако, должны быть ниже линии PSK диаграммы Fe-Fe₃C. Поэтому температура нагрева для рекристаллизационного отжига составляет 650...700 °С. В результате рекристаллизационного отжига образуется однородная мелкозернистая структура с небольшой твёрдостью и значительной вязкостью.

Низкий отжиг применяется в тех случаях, когда структура стали удовлетворительна и необходимо только снять внутренние напряжения, возникающие при кристаллизации или после механической обработки. В этом случае сталь нагревают значительно ниже линии PSK диаграммы Fe-Fe₃C (200...600 °С).

Отжиг на зернистый перлит (сфероидизацию) применяют для сталей, близких к эвтектоидному составу, или для заэвтектоидных. Такой отжиг осуществляют маятниковым способом (температуру несколько раз изменяют вблизи линии PSK, то перегревая выше неё на 30...50 °С, то охлаждая ниже на 30...50 °С) или путём длительной выдержки (5-6 часов) при температуре несколько выше линии PSK и последующего медленного охлаждения. После такого отжига цементит, обычно присутствующий в структуре в виде пластин, приобретает зернистую форму. Сталь со структурой зернистого перлита обладает большей пластичностью, меньшей твёрдостью и прочностью по сравнению с пластинчатым перлитом. Отжиг на зернистый перлит применяется для подготовки сталей к закалке или для улучшения их обрабатываемости резанием.

Нормализация состоит из нагрева стали на 30...50 °С выше линии GSE диаграммы Fe-Fe₃C (рис. 18), выдержки при этой температуре и последующего охлаждения на воздухе. Более быстрое охлаждение по сравнению с обычным отжигом приводит к более мелкозернистой структуре. Нормализация – более дешёвая термическая операция, чем отжиг, так как печи используют только для нагрева и

выдержки. Для низкоуглеродистых сталей (до 0,3 % С) разница в свойствах между нормализованным и отожжённым состоянием практически отсутствует и эти стали лучше подвергать нормализации. При большем содержании углерода нормализованная сталь обладает большей твёрдостью и меньшей вязкостью, чем отожжённая. Иногда нормализацию считают самостоятельной разновидностью термической обработки, а не видом отжига.

Лекция 6. Закалка и отпуск стали

Превращения в стали при охлаждении. При медленном охлаждении стали образуются структуры, соответствующие диаграмме Fe-Fe₃C. Вначале происходит выделение феррита (в доэвтектоидных сталях) или вторичного цементита (в заэвтектоидных сталях), а затем происходит превращение аустенита в перлит. Это превращение заключается в распаде аустенита на феррит, почти не содержащий углерода, и цементит, содержащий 6,67 % С. Поэтому превращение сопровождается диффузией, перераспределением углерода. Диффузионные процессы происходят в течение некоторого времени, причём скорость диффузии резко падает с понижением температуры. Обычно изучают изотермическое превращение аустенита (происходящее при выдержке при постоянной температуре) для эвтектоидной стали. Влияние температуры на скорость и характер превращения представляют в виде диаграммы изотермического превращения аустенита (рис. 24).

Диаграмма строится в координатах температура – логарифм времени.

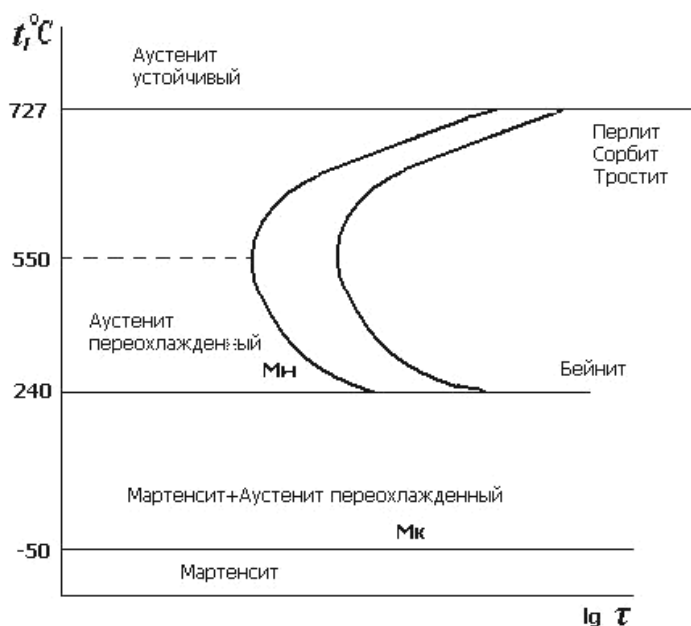


Рис. 24. Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали (схема)

Выше температуры 72 °С на диаграмме находится область устойчивого аустенита. Ниже этой температуры аустенит является неустойчивым и превращается в другие структуры. Первая С-образная кривая на диаграмме соответствует началу превращения аустенита, а вторая – его завершению. При небольшом переохлаждении – приблизительно до 550 °С – происходит упомянутое выше диффузионное перлитное превращение.

В зависимости от степени переохлаждения образуются структуры, называемые перлит, сорбит и тростит. Это структуры одного типа – механические смеси феррита и цементита, имеющие пластинчатое строение. Отличаются они лишь степенью дисперсности, т.е. толщиной пластинок феррита и цементита. Наиболее крупнодисперсная структура – перлит, наиболее мелкодисперсная – тростит. При переохлаждении аустенита приблизительно ниже 240 °С скорость диффузии падает почти до нуля и происходит бездиффузионное мартенситное превращение. Образуется мартенсит – пересыщенный твёрдый раствор углерода в α -железе. Мартенсит имеет ту же концентрацию углерода, что и исходный аустенит. Из-за высокой пересыщенности углеродом решётка мартенсита сильно искажается, благодаря чему мартенсит имеет высокую твёрдость (до HRC 65). Горизонтальная линия M_n диаграммы соответствует началу превращения аустенита в мартенсит, а линия M_k – завершению этого процесса.

В диапазоне температур от мартенситного до перлитного превращения происходит промежуточное превращение и образуется структура, называемая бейнит.

Закалка – это вид термической обработки, состоящий в нагреве стали до определённой температуры, выдержке и последующем быстром охлаждении. В результате закалки повышается твёрдость и прочность, но снижается вязкость и пластичность. Нагрев стали производится на 30...50 °С выше линии GSK диаграммы Fe-Fe₃C. В доэвтектоидных сталях нагрев выше линии GS необходим для того, чтобы после закалки в структуре не было мягких ферритных включений. Для заэвтектоидных сталей применяется нагрев выше линии SK, так как присутствие цементита не снижает твёрдость стали.

Обычно в результате закалки образуется мартенситная структура. Поэтому охлаждать сталь следует с такой скоростью, чтобы кривая охлаждения не пересекала С-образные кривые диаграммы изотермического превращения аустенита (рис. 19). Для достижения высокой скорости охлаждения закаливаемые детали погружают в воду (для углеродистых сталей) или минеральные масла (для легированных сталей).

Способность стали закаливаться на мартенсит называется закаливаемостью. Она характеризуется значением твёрдости, приобретаемой сталью после закалки, и зависит от содержания углерода. Стали с низким содержанием углерода (до 0,3 %) практически не закаливаются и закалка для них не применяется.

Прокаливаемостью называется глубина проникновения закаленной зоны. Отсутствие сквозной прокаливаемости объясняется тем, что при охлаждении сердцевина остывает медленнее, чем поверхность. Прокаливаемость характеризует критический диаметр $D_{кр}$, т.е. максимальный диаметр детали цилиндрического сечения, которая прокаливается насквозь в данном охладителе.

Отпуск стали – это вид термической обработки, следующий за закалкой и заключающийся в нагреве стали до определённой температуры (ниже линии PSK), выдержке и охлаждении. Цель отпуска – получение более равновесной по сравнению с мартенситом структуры, снятие внутренних напряжений, повышение вязкости и пластичности. Различают низкий, средний и высокий отпуск.

Низкий отпуск проводится при температуре 150...200 °С. В результате снимаются внутренние напряжения, происходит некоторое увеличение пластичности и вязкости без заметного снижения твёрдости. Образуется структура мартенсит отпуска. Низкому отпуску подвергают режущий и мерительный инструмент, а также детали, которые должны обладать высокой твёрдостью и износостойкостью.

При среднем отпуске производится нагрев до 350...450 °С. При этом происходит некоторое снижение твёрдости при значительном увеличении предела упругости и улучшении сопротивляемости действию ударных нагрузок. Структура стали представляет собой тростит отпуска, который имеет зернистое, а не пластинчатое строение. Применяется для пружин, рессор, ударного инструмента.

Высокий отпуск проводится при 550...650 °С. В результате твёрдость и прочность снижаются значительно, но сильно возрастают вязкость и пластичность и получается оптимальное для конструкционных сталей сочетание механических свойств. Структура стали – сорбит отпуска с зернистым строением цементита. Применяется для деталей, подвергающихся действию высоких нагрузок. Термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска, называется улучшением. Она является основным видом обработки конструкционных сталей.

Поверхностная закалка состоит в нагреве поверхностного слоя стальных деталей до аустенитного состояния и быстрого охлаждения с целью получения высокой твёрдости и прочности в поверхностном

слое в сочетании с вязкой сердцевиной. Существуют различные способы нагрева поверхности под закалку – в расплавленных металлах или солях, пламенем газовой горелки, лазерным излучением, током высокой частоты. Последний способ получил наибольшее распространение в промышленности.

При нагреве токами высокой частоты закаливаемую деталь помещают внутри индуктора, представляющего собой медные трубки с циркулирующей внутри для охлаждения водой. Форма индуктора соответствует внешней форме детали. Через индуктор пропускают электрический ток (частотой 500 Гц...10 МГц). При этом возникает электромагнитное поле, которое индуцирует вихревые токи, нагревающие поверхность детали. Глубина нагретого слоя уменьшается с увеличением частоты тока и увеличивается с возрастанием продолжительности нагрева. Регулируя частоту и продолжительность, можно получить необходимую глубину закалённого слоя, находящуюся в пределах 1...10 мм.

Преимуществами закалки токами высокой частоты являются регулируемая глубина закалённого слоя, высокая производительность (нагрев одной детали длится 10 с), возможность автоматизации, отсутствие окалинообразования. Недостаток – высокая стоимость индуктора, который является индивидуальным для каждой детали. Поэтому этот вид закалки применим, в основном, к крупносерийному и массовому производству.

Перспективный метод поверхностной закалки стальных деталей сложной формы – лазерная обработка. Благодаря высокой плотности энергии в луче лазера возможен быстрый нагрев очень тонкого слоя металла. Последующий быстрый отвод тепла в объём металла приводит к закалке поверхностного слоя с приданием ему высокой твёрдости и износостойкости.

Химико-термическая обработка – это процесс изменения химического состава, структуры и свойств поверхности стальных деталей за счёт насыщения её различными химическими элементами. При этом достигается значительное повышение твёрдости и износостойкости поверхности деталей при сохранении вязкой сердцевины. К видам химико-термической обработки относятся цементация, азотирование, цианирование и др.

Цементация – это процесс насыщения поверхностного слоя стальных деталей углеродом. Цементация производится путём нагрева стальных деталей при 880...950 °С в углеродосодержащей среде, называемой карбюризатором. Различают два основных вида цементации –

газовую и твёрдую. Газовая цементация проводится в газе, содержащем метан CH_4 и оксид углерода CO . Твёрдая цементация проводится в стальных ящиках, куда укладываются детали попеременно с карбюризатором. Карбюризатором служит порошок древесного угля с добавкой солей Na_2CO_3 или BaCO_3 .

Цементации подвергают стали с низким содержанием углерода (0,1...0,3 %). В результате на поверхности концентрация углерода возрастает до 1,0...1,2 %. Толщина цементованного слоя составляет 1...2,5 мм.

Цементацией достигается только выгодное распределение углерода по сечению детали. Высокая твёрдость и износостойкость поверхности получается после закалки, которая обязательно проводится после цементации. Затем следует низкий отпуск. После этого твёрдость поверхности составляет HRC 60.

Азотированием называется процесс насыщения поверхности стали азотом. При этом повышаются не только твёрдость и износостойкость, но и коррозионная стойкость. Проводится азотирование при температуре 500...600 °C в среде аммиака NH_3 в течение длительного времени (до 60 ч). Аммиак при высокой температуре разлагается с образованием активного атомарного азота, который и взаимодействует с металлом.

Твёрдость стали повышается за счёт образования нитридов легирующих элементов. Поэтому азотированию подвергают только легированные стали. Наиболее сильно повышают твёрдость такие легирующие элементы, как хром, молибден, алюминий, ванадий. Глубина азотированного слоя составляет 0,3...0,6 мм, твёрдость поверхностного слоя по Виккерсу доходит до HV 1200 (при цементации HV 900). К преимуществам азотирования перед цементацией следует отнести отсутствие необходимости в дополнительной термообработке, более высокую твёрдость и износостойкость, высокую коррозионную стойкость поверхности. Недостатками являются низкая скорость процесса и необходимость применения дорогих легированных сталей.

Цианирование (нитроцементация) – это процесс одновременно насыщения поверхности стали углеродом и азотом. Проводится цианирование в расплавах цианистых солей NaCN или KCN или в газовой среде, содержащей смесь метана CH_4 и аммиака NH_3 . Различают низкотемпературное и высокотемпературное цианирование.

Низкотемпературное цианирование проводится при температуре 500...600 °C. При этом преобладает насыщение азотом. Глубина цианированного слоя составляет 0,2...0,5 мм, твёрдость поверхности –

HV 1000. При высокотемпературном цианировании температура составляет 800...950 °С. Преобладает насыщение углеродом. Глубина поверхностного слоя составляет 0,6...2,0 мм. После высокотемпературного цианирования следует закалка с низким отпуском. Твёрдость после термообработки составляет HRC 60.

Поверхностное упрочнение пластическим деформированием основано на способности стали к наклёпу при пластической деформации. Наиболее распространёнными способами такого упрочнения поверхности являются дробеструйная обработка и обработка поверхности роликами или шариками.

В результате повышается твёрдость и износостойкость обработанной поверхности. Кроме того, сглаживаются мелкие поверхностные дефекты. Глубина упрочнённого слоя при дробеструйной обработке составляет около 0,7 мм. Обкатка роликами производится с помощью специальных приспособлений на токарных станках. Помимо упрочнения, обкатка снижает шероховатость обрабатываемой поверхности. Глубина упрочнённого слоя доходит до 15 мм.

ТЕМА 3. МАТЕРИАЛЫ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Из 106 элементов периодической системы 84 – металлы, 22 – неметаллы.

Металлы в твёрдом и, отчасти, в жидком состояниях обладают рядом характерных свойств:

- 1) высокой тепло- и электропроводностью;
- 2) положительным температурным коэффициентом электросопротивления;
- 3) хорошей отражательной способностью; металлы непрозрачны и обладают металлическим блеском;
- 4) повышенной способностью к пластической деформации.

Классификация материалов включает в себя три основных разновидности материалов: **металлические материалы, неметаллические материалы, композиционные материалы.**

Лекция 7. Металлические материалы

Металлические материалы принято классифицировать по основному компоненту. По ряду признаков их разбивают на группы:

1. Чёрные металлы:
 - 1) железистые (железо, никель);
 - 2) тугоплавкие (с температурой плавления $> 1539^{\circ}$);

- 3) урановые (уран, плутоний);
- 4) редкоземельные (церий, неодим);
- 5) щелочноземельные (калий, натрий).

2. Цветные металлы:

- 1) лёгкие (магний, алюминий);
- 2) благородные (золото, платина);
- 3) легкоплавкие (висмут, свинец).

К материалам чёрной металлургии принадлежат стали, чугуны, ферросплавы и сплавы на основе железа, легированные цветными металлами в количестве, превосходящем стали.

К материалам цветной металлургии принадлежат важнейшие цветные металлы – алюминий, медь, цинк, свинец, никель, олово и сплавы на их основе. К металлическим материалам относятся и материалы порошковой металлургии.

Стали

Сталью называется сплав железа с углеродом, в котором углерода содержится не более 2,14 %. Это теоретическое определение. На практике в сталях, как правило, не содержится углерода более 1,5 %.

Влияние углерода и примесей на свойства стали. Углерод существенно влияет на свойства стали даже при незначительном изменении его содержания. В стали имеются две фазы – феррит и цементит (частично в виде перлита). Количество цементита возрастает прямо пропорционально содержанию углерода. Как уже говорилось, феррит характеризуется высокой пластичностью и низкой твёрдостью, а цементит, напротив, очень низкой пластичностью и высокой твёрдостью. Поэтому с повышением содержания углерода до 1,2 % снижаются пластичность и вязкость стали и повышаются твёрдость и прочность.

Повышение содержания углерода влияет и на технологические свойства стали. Ковкость, свариваемость и обрабатываемость резанием ухудшаются, но литейные свойства улучшаются.

Кроме железа и углерода в стали всегда присутствуют постоянные примеси. Наличие примесей объясняется технологическими особенностями производства стали (марганец, кремний) и невозможностью полного удаления примесей, попавших в сталь из железной руды (сера, фосфор, кислород, водород, азот). Возможны также случайные примеси (хром, никель, медь и др.).

Марганец и кремний вводят в любую сталь для раскисления, т.е. для удаления вредных примесей оксида железа FeO. Марганец также устраняет вредные сернистые соединения железа. При этом содержание марганца обычно не превышает 0,8 %, а кремния – 0,4 %. Марганец повышает прочность, а кремний – упругость стали.

Фосфор растворяется в феррите, сильно искажает кристаллическую решётку, снижая при этом пластичность и вязкость, но повышая прочность. Вредное влияние фосфора заключается в том, что он сильно повышает температуру перехода стали в хрупкое состояние, т.е. вызывает её хладноломкость. Вредность фосфора усугубляется тем, что он может распределяться в стали неравномерно. Поэтому содержание фосфора в стали ограничивается величиной 0,045 %.

Сера также является вредной примесью. Она нерастворима в железе и образует с ним сульфид железа FeS, который образует с железом легкоплавкую эвтектику. Эвтектика располагается по границам зёрен и делает сталь хрупкой при высоких температурах. Это явление называется красноломкостью. Количество серы в стали ограничивается 0,05 %.

Водород, азот и кислород содержатся в стали в небольших количествах. Они являются вредными примесями, ухудшающими свойства стали.

Классификация сталей. По химическому составу стали могут быть углеродистыми, содержащими железо, углерод и примеси, и легированными, содержащими дополнительно легирующие элементы, введённые в сталь с целью изменения её свойств.

По содержанию углерода стали делятся на низкоуглеродистые (до 0,25 % C), среднеуглеродистые (0,25...0,7 % C) и высокоуглеродистые (более 0,7 % C).

По назначению различают стали конструкционные, идущие на изготовление деталей машин, конструкций и сооружений, инструментальные, идущие на изготовление различного инструмента, а также стали специального назначения с особыми свойствами: нержавеющие, жаростойкие, жаропрочные, износостойкие, с особыми электрическими и магнитными свойствами и др.

По показателям качества стали классифицируются на обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные. Качество стали характеризуется совокупностью свойств, определяемых процессом производства, химическим составом, содержанием газов и вредных примесей (серы и фосфора). В соответствии с ГОСТом стали обыкновенного качества должны

содержать не более 0,045 % Р и 0,05 % S, качественные – не более 0,035 % Р и 0,04 % S, высококачественные – не более 0,025 % Р и 0,025 % S и особо высококачественные – не более 0,025 % Р и 0,015 % S. Углеродистые конструкционные стали могут быть только обыкновенного качества и качественными.

Качественные конструкционные углеродистые стали маркируются цифрами 08, 10, 15, 20, 25, ..., 85, которые обозначают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Эти стали отличаются от сталей обыкновенного качества большей прочностью, пластичностью и ударной вязкостью. Если для сталей обыкновенного качества максимальная прочность составляет 700 МПа, то для качественной она достигает 1100 МПа.

Легированные стали

Легированной называют сталь, содержащую специально введенные в неё с целью изменения строения и свойств легирующие элементы. Легированные стали имеют целый ряд преимуществ перед углеродистыми. Они имеют более высокие механические свойства, прежде всего прочность. Легированные стали обеспечивают большую прокаливаемость, а также возможность получения структуры мартенсита при закалке в масле, что уменьшает опасность появления трещин и коробления деталей. С помощью легирования можно придать стали различные специальные свойства (коррозионную стойкость, жаростойкость, жаропрочность, износостойкость, магнитные и электрические свойства).

Стали обыкновенного качества могут быть только углеродистыми, т.е. легированные стали, как минимум, являются качественными.

Маркируются легированные стали с помощью цифр и букв, указывающих примерный химический состав стали. Первые цифры в марке показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Далее показывается содержание легирующих элементов. Каждый элемент обозначается своей буквой: Н – никель, Г – марганец, Ц – цирконий, Т – титан, Х – хром, Д – медь, С – кремний, А – азот, К – кобальт, Р – бор, П – фосфор, Ф – ванадий, М – молибден, Б – ниобий, В – вольфрам, Ю – алюминий. Цифры, идущие после буквы, указывают примерное содержание данного легирующего элемента в процентах. При содержании элемента менее 1 % цифра отсутствует. Например, сталь 12Х18Н10Т содержит приблизительно 0,12 % углерода, 18 % хрома, 10 % никеля, менее 1 % титана. Для некоторых групп сталей применяют другую маркировку, которая будет указана при рассмотрении этих сталей.

Конструкционные стали

Конструкционные стали идут на изготовление деталей машин, конструкций и сооружений. Они должны обеспечивать длительную и надёжную работу деталей и конструкций в условиях эксплуатации. Поэтому основное требование к конструкционным сталям – комплекс высоких механических свойств.

Строительные стали содержат малые количества углерода (0,1...0,3 %). Это объясняется тем, что детали строительных конструкций обычно соединяются сваркой. Низкое содержание углерода обеспечивает хорошую свариваемость.

В качестве строительных используются углеродистые стали Ст2 и Ст3, имеющие предел текучести $\sigma_{0,2}=240$ МПа. В низколегированных строительных сталях при содержании около 1,5 % Mn и 0,7 % Si предел текучести увеличивается до 360 МПа. К этим сталям относятся 14Г2, 17ГС, 14ХГС. Дополнительное легирование небольшими количествами ванадия и ниобия (до 0,1 %) повышает предел текучести до 450 МПа за счёт уменьшения величины зерна. К сталям такого типа относятся 14Г2АФ, 17Г2АФБ.

Приведённые стали применяют для строительных конструкций, армирования железобетона, магистральных нефтепроводов и газопроводов.

Цементуемые стали содержат 0,1...0,3 % углерода. Они подвергаются цементации, закалке и низкому отпуску. После этой обработки твёрдость поверхности составляет HRC 60, а сердцевины HRC – 15...40. Упрочнение сердцевины в этих сталях тем сильнее, чем больше содержание легирующих элементов. В зависимости от степени упрочнения сердцевины цементуемые стали можно разделить на три группы.

К сталям с неупрочняемой сердцевиной относятся углеродистые цементуемые стали 10, 15, 20. Их сердцевина имеет феррито-перлитную структуру. Эти стали имеют высокую износостойкость, но малую прочность ($\sigma_b = 400...500$ МПа). Поэтому они применяются для малоответственных деталей небольших размеров.

К сталям со слабо упрочняемой сердцевиной относятся низколегированные стали 15Х, 15ХР, 20ХН и др. Сердцевина имеет структуру бейнит. Эти стали имеют повышенную прочность ($\sigma_b = 750...850$ МПа). К сталям с сильно упрочняемой сердцевиной относятся стали 20ХГР, 18ХГТ, 30ХГТ, 12ХНЗ, 18Х2Н4В и др. Сердцевина имеет мартенситную структуру. Стали этой группы имеют высокую прочность ($\sigma_b = 1200...1600$ МПа) и применяются для крупных деталей, испытывающих значительные нагрузки.

Улучшаемые стали содержат 0,3...0,5 % углерода и небольшое количество легирующих элементов (до 3...5 %). Эти стали подвергаются улучшению, состоящему из закалки в масле и высокого отпуска. После термообработки имеют структуру сорбита. Механические свойства разных марок улучшаемой стали в случае сквозной прокаливаемости близки ($\sigma_b = 900...1200$ МПа). Поэтому прокаливаемость определяет выбор стали. Чем больше легирующих элементов, тем выше прокаливаемость. Следовательно, чем больше сечение детали, тем более легированную сталь следует использовать. По прокаливаемости улучшаемые стали могут быть условно разбиты на пять групп.

В первую группу входят углеродистые стали 35, 40, 45. Эти стали подвергаются нормализации вместо улучшения.

Ко второй группе относятся стали, легированные хромом 30Х, 40Х.

Третью группу составляют хромистые стали, дополнительно легированные ещё одним – двумя элементами (кроме никеля) 30ХМ, 40ХГ, 30ХГС и др. Четвёртая группа представлена хромоникелевыми сталями, содержащими около 1 % никеля: 40ХН, 40ХНМ и др.

В пятую группу входят стали, легированные рядом элементов, причём содержание никеля доходит до 3...4 %: 38ХНЗ, 38ХНЗМФ. Это лучшие марки улучшаемых сталей, хотя они сравнительно дороги.

Высокопрочные стали. Новейшая техника предъявляет высокие требования к прочности стали ($\sigma_b = 1500...2500$ МПа). Этим требованиям соответствуют мартенситностареющие стали, сочетающие высокую прочность с достаточной вязкостью и пластичностью. Они представляют собой практически безуглеродистые (до 0,03 % С) сплавы железа с никелем (17...26 % Ni), дополнительно легированные титаном, алюминием, молибденом, ниобием и кобальтом.

Широкое распространение получила сталь Н18К9М5Т. Она подвергается закалке на воздухе с 800...850 °С. Высокую прочность мартенситностареющие стали получают в результате старения, представляющего собой отпуск, производимый при температуре 450...500 °С. В результате такой термообработки сталь Н18К9М5Т имеет предел прочности $\sigma_b = 2000$ МПа. Кроме упомянутой выше стали, нашли применение стали Н12К8М3Г2, МЮХ11М2Т, Н12К8М4Г2 и др. Мартенситностареющие стали применяют в авиационной промышленности, в ракетной технике, судостроении и т.д. Они обладают хорошей свариваемостью и обрабатываемостью. Эти стали являются достаточно дорогостоящими.

Износостойкие стали способны сопротивляться процессу изнашивания. Изнашивание – это процесс постепенного разрушения поверхностных слоёв трущихся деталей, который приводит к уменьшению их размеров (износу). Износостойкие стали можно разделить на три группы.

В первую группу входят стали, износостойкость которых достигается высокой твёрдостью поверхности. Они подвергаются закалке и низкому отпуску или химико-термической обработке.

Имеют структуру мартенсита или мартенсита с карбидными включениями. К этой группе относятся подшипниковые стали, из которых изготавливаются шарики и ролики подшипников качения. Содержание углерода в них около 1 %.

Ко второй группе относятся стали, износостойкость которых достигается смазывающим действием графита. Эти стали имеют в структуре графитные включения, которые в процессе изнашивания выходят на поверхность и выполняют роль сухой смазки. Эти стали имеют высокое содержание углерода (~1 %) и кремния (~1 %), что повышает способность к графитизации.

Третью группу составляют стали, износостойкость которых достигается повышенной склонностью к наклёпу, плохо обрабатывается резанием, поэтому применяется в литом состоянии.

Стали со специальными свойствами

Коррозионностойкие (нержавеющие) стали. Коррозией называется разрушение металла под действием внешней агрессивной среды в результате её химического или электрохимического воздействия. Различают химическую коррозию, обусловленную воздействием на металл сухих газов и неэлектролитов (например, нефтепродуктов) и электрохимическую, возникающую под действием жидких электролитов или влажного воздуха. По характеру коррозионного разрушения различают сплошную и местную коррозию. Сплошная коррозия захватывает всю поверхность металла. Её делят на равномерную и неравномерную в зависимости от того, одинаковая ли глубина коррозионного разрушения на разных участках. При местной коррозии поражения локальны. В зависимости от степени локализации различают пятнистую, язвенную, точечную, межкристаллитную и другие виды местной коррозии.

Самый надёжный способ защиты от коррозии – применение коррозионностойких сталей. Коррозионная стойкость достигается при введении в сталь элементов, образующих на её поверхности тонкие и прочные оксидные плёнки. Наилучший из этих элементов –

хром. При введении в сталь 12...14 % хрома она становится устойчивой против коррозии в атмосфере, воде, ряде кислот, щелочей и солей. Стали, содержащие меньшее количество хрома, подвержены коррозии точно так же, как и углеродистые стали. В технике применяют хромистые и хромоникелевые коррозионностойкие стали.

Другие методы защиты от коррозии. Распространённым средством защиты от коррозии является нанесение на защищаемый металл различных покрытий. Металлические покрытия наносятся различными способами. При погружении в расплавленный металл поверхность изделия покрывается тонким и плотным слоем, затвердевающим после извлечения изделия. Этот способ применяется для нанесения покрытий цинком, оловом, свинцом и алюминием, температура плавления которых ниже, чем у защищаемого металла.

Жаростойкие и жаропрочные стали. Под жаростойкими сталями понимают стали, обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности при высокой температуре (выше 550 °С).

Для повышения жаростойкости сталь легируют элементами, образующими плотную плёнку, через которую атомы кислорода не проникают. Эти элементы – хром, алюминий, кремний. Так как алюминий и кремний повышают хрупкость стали, чаще всего применяют хром. Чем больше его содержание, тем более жаропрочной является сталь.

Жаропрочные материалы способны противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах. Жаропрочные стали классифицируются по структуре.

Инструментальные стали и сплавы

По назначению инструментальные стали делятся на стали для режущего, измерительного и штампового инструмента. Кроме сталей, для изготовления режущего инструмента применяются металлокерамические твёрдые сплавы и минералокерамические материалы. Режущий инструмент работает в сложных условиях, подвержен интенсивному износу, при работе часто разогревается. Поэтому материал для изготовления режущего инструмента должен обладать высокой твёрдостью, износостойкостью и теплостойкостью. Теплостойкость – это способность сохранять высокую твёрдость и режущие свойства при длительном нагреве.

Углеродистые инструментальные стали содержат 0,7...1,3 % углерода. Они маркируются буквой У и цифрой, показывающими содержание углерода в десятых долях процента (У7, У8, У9, ..., У13). Буква А в конце марки показывает, что сталь высококачественная (У7А, У8А, ..., У13А). Кроме того, эти стали достаточно дешёвы и в незакалённом состоянии сами хорошо обрабатываются.

Низколегированные инструментальные стали содержат в сумме около 1...3 % легирующих элементов. Они обладают повышенной по сравнению с углеродистыми сталями прокаливаемостью, но теплостойкость их невелика – до 400 °С. Основные легирующие элементы – хром, кремний, вольфрам, ванадий.

Быстрорежущие стали – предназначены для работы при высоких скоростях резания. Главное их достоинство – высокая теплостойкость (до 650 °С). Это достигается за счёт большого количества легирующих элементов – вольфрама, хрома, молибдена, ванадия, кобальта. Маркируются быстрорежущие стали буквой Р, число после которой показывает среднее содержание вольфрама в %. Далее идут обозначения и содержание других легирующих элементов. Содержание углерода во всех быстрорежущих сталях приблизительно 1 %, а хрома – 4 %. Поэтому эти элементы в марке не указываются. Например, Р18, Р9, Р6М5, Р6М5Ф2К8.

Чугуны

Чугуном называют сплав железа с углеродом, содержащий от 2,14 до 6,67 % углерода. Но это теоретическое определение. На практике содержание углерода в чугунах находится в пределах 2,5...4,5 %. В качестве примесей чугун содержит Si, Mn, S и P.

Классификация чугунов. В зависимости от того, в какой форме содержится углерод в чугунах, различают следующие их виды. В белом чугуне весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита. Структура белого чугуна соответствует диаграмме Fe-Fe₃C. В сером чугуне большая часть углерода находится в виде графита, включения которого имеют пластинчатую форму. В высокопрочном чугуне графитные включения имеют шаровидную форму, а в ковком – хлопьевидную. Содержание углерода в виде цементита в сером, высокопрочном и ковком чугунах может составлять не более 0,8 %.

Белый чугун обладает высокой твёрдостью, хрупкостью и очень плохо обрабатывается. Поэтому для изготовления изделий он не используется и применяется как предельный чугун, т.е. идёт на производство стали. Для деталей с высокой износостойкостью используется чугун с отбеленной поверхностью, в котором основная масса металла имеет структуру серого чугуна, а поверхностный слой – белого чугуна. Машиностроительными чугунами, идущими на изготовление деталей, являются серый, высокопрочный и ковый чугуны. Детали из них изготавливаются литьём, так как чугуны имеют очень хорошие

литейные свойства. Благодаря графитным включениям эти чугуны хорошо обрабатываются, имеют высокую износостойкость, гасят колебания и вибрации. Но графитные включения уменьшают прочность.

Таким образом, структура машиностроительных чугунов состоит из металлической основы и графитных включений. По металлической основе они классифицируются на ферритный чугун (весь углерод содержится в виде графита), феррито-перлитный и перлитный (содержит 0,8 % углерода в виде цементита). Характер металлической основы влияет на механические свойства чугунов: прочность и твёрдость выше у перлитных, а пластичность – у ферритных.

Серый чугун имеет пластинчатые графитные включения. Структура серого чугуна схематически изображена на рисунке 25а. Получают серый чугун путём первичной кристаллизации из жидкого сплава.

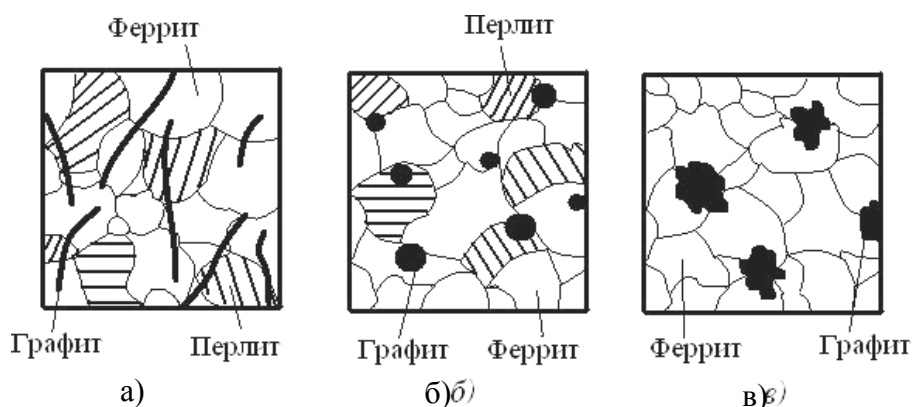


Рис. 25. Схематическое изображение структур чугунов:
а – серого; б – высокопрочного; в – ковкого

На графитизацию (процесс выделения графита) влияют скорость охлаждения и химический состав чугуна. При быстром охлаждении графитизации не происходит и получается белый чугун. По мере уменьшения скорости охлаждения получают, соответственно, перлитный, феррито-перлитный и ферритный серые чугуны. Способствуют графитизации углерод и кремний.

Кремния содержится в чугуне от 0,5 до 5 %. Иногда его вводят специально. Марганец и сера препятствуют графитизации. Кроме того, сера ухудшает механические и литейные свойства. Фосфор не влияет на графитизацию, но улучшает литейные свойства.

Механические свойства серого чугуна зависят от количества и размера графитных включений. По сравнению с металлической основой графит имеет низкую прочность. Поэтому графитные включения можно считать нарушениями сплошности, ослабляющими металлическую основу. Так как пластинчатые включения наиболее сильно ослабляют металлическую основу, серый чугун имеет наиболее низкие характеристики как прочности, так и пластичности среди всех машиностроительных чугунов. Уменьшение размера графитных включений улучшает механические свойства. Измельчению графитных включений способствует кремний.

Маркируется серый чугун буквами СЧ и числом, показывающим предел прочности в десятых долях мегапаскаля. Так, чугун СЧ 35 имеет $\sigma_b = 350$ МПа. Имеются следующие марки серых чугунов: СЧ 10, СЧ 15, СЧ 20, ..., СЧ 45.

Высокопрочный чугун имеет шаровидные графитные включения. Структура высокопрочного чугуна изображена на рисунке 23б. Получают высокопрочный чугун добавкой в жидкий чугун небольшого количества щелочных или щелочноземельных металлов, которые округляют графитные включения в чугуне, что объясняется увеличением поверхностного натяжения графита. Чаще всего для этой цели применяют магний в количестве 0,03...0,07 %. По содержанию других элементов высокопрочный чугун не отличается от серого.

Шаровидные графитные включения в наименьшей степени ослабляют металлическую основу. Именно поэтому высокопрочный чугун имеет более высокие механические свойства, чем серый. При этом он сохраняет хорошие литейные свойства, обрабатываемость резанием, способность гасить вибрации и т.д.

Маркируется высокопрочный чугун буквами ВЧ и цифрами, показывающими предел прочности в десятых долях мегапаскаля. Например, чугун ВЧ 60 имеет $\sigma_b = 600$ МПа. Существуют следующие марки высокопрочных чугунов: ВЧ 35, ВЧ 40, ВЧ 45, ВЧ 50, ВЧ 60, ВЧ 70, ВЧ 80, ВЧ 100. Применяются высокопрочные чугуны для изготовления ответственных деталей – зубчатых колёс, валов и др.

Ковкий чугун имеет хлопьевидные графитные включения (рис. 23в). Его получают из белого чугуна путём графитизирующего отжига, который заключается в длительной (до 2 суток) выдержке при температуре 950...970 °С. Если после этого чугун охладить, то получается ковкий перлитный чугун, металлическая основа которого состоит из перлита и небольшого количества (до 20 %) феррита. Такой чугун называют также светлосердечным.

Если в области эвтектоидного превращения (720...760 °С) проводить очень медленное охлаждение или даже дать выдержку, то получится ковкий ферритный чугун, металлическая основа которого состоит из феррита и очень небольшого количества перлита (до 10 %). Этот чугун называют черносердечным, так как он содержит сравнительно много графита.

Маркируется ковкий чугун буквами КЧ и двумя числами, показывающими предел прочности и относительное удлинение в %. Так, чугун КЧ 45-7 имеет $\sigma_b = 450$ МПа и $\delta = 7$ %. Ферритные ковкие чугуны (КЧ 33-8, КЧ 37-12) имеют более высокую пластичность, а перлитные (КЧ 50-4, КЧ 60-3) – более высокую прочность. Применяют ковкий чугун для деталей небольшого сечения, работающих при ударных и вибрационных нагрузках.

Лекция 8. Неметаллические материалы

Современную машину или прибор невозможно создать, применяя только металлические материалы. Ряд неметаллических материалов, полученных современной промышленностью обладают значительно более высокими физическими и химическими свойствами. В то же время, такие уникальные свойства этих материалов как электрические изолирующие свойства, эластичность, прозрачность делают эти материалы просто незаменимыми.

Неметаллические материалы условно можно разделить на искусственные и природные, органические и минеральные, однородные и композиционные.

Неметаллические материалы различают по основным классам: резина, керамика, стекло, пластические массы, ситаллы¹.

Пластические массы и другие неметаллические материалы

Неметаллические материалы: синтетические смолы и пластмассы, синтетические каучуки, заменяющие натуральный каучук, высококачественные полимеры с заданными техническими характеристиками, включая армированные и наполненные пластмассы.

¹ **Ситаллы** – стеклокристаллические материалы, полученные объёмной кристаллизацией стёкол и состоящие из одной или нескольких кристаллических фаз, равномерно распределённых в стекловидной фазе. Ситаллы обладают малой плотностью (они легче алюминия), высокой механической прочностью, особенно на сжатие, твёрдостью, жаропрочностью, термической стойкостью, химической устойчивостью и другими ценными свойствами. Ситаллы имеют большинство положительных свойств, которые есть у стекла, в том числе и технологичность.

Пластические массы и другие неметаллические материалы обладают рядом превосходных физико-химических, механических и технологических свойств, что обусловило их широкое распространение в различных отраслях промышленности – машиностроении, электротехнике, электронике и др. Как конструкционный материал, пластические массы всё более вытесняют дорогостоящие металлы. Применение пластических масс даёт возможность постоянно совершенствовать конструкции. Оснащение машин и оборудования, а также частичная комплектация различных узлов позволяют снизить их массу, улучшить надёжность и долговечность работы, повысить производительность с наименьшими капитальными вложениями, чем для производства цветных металлов. Исходными материалами для получения пластических масс служат дешёвые продукты переработки каменного угля, нефти и природного газа.

Пластмассы подвергают армированию для улучшения механических свойств. Для изготовления различных деталей, работающих в механизмах трения (скольжения) с небольшими нагрузками и скоростями, применяются такие неметаллические материалы, как антифрикционные полимерные и пластмассовые материалы. Эти материалы обладают небольшим коэффициентом трения, высокой износостойкостью, химической стойкостью, могут работать без смазки. Однако низкая теплопроводность, значительный (в десятки раз больше, чем у металлов) коэффициент термического расширения, небольшая твёрдость и высокая податливость ограничивают возможности их широкого использования. Более эффективно они применяются в комбинации с другими материалами, металлами и пластмассами. Неметаллические материалы широко применяются в различных отраслях промышленности и хозяйства в целом.

Наибольшее распространение в технике получили неметаллические материалы на основе различных полимеров.

Полимеры – это сложные высокомолекулярные соединения, макромолекулы которых состоят из многочисленных элементарных звеньев. Эти составные звенья представляют собой небольшие молекулы и называются мономерами.

В настоящее время трудно представить себе медицину без полимерных систем для переливания крови, медицинскую аппаратуру – без прозрачных полимерных трубок, предметы ухода за больными – без резиновых грелок, пузырей для льда и т.д. Значительно обогатить ассортимент материалов, применяемых в медицине, позволили синтетические полимеры.

Свойства полимеров определяются: природой мономера, молекулярной массой полимера, структурой полимера (кристаллический полимер или аморфный полимер), температурой нагрева. Полимеры могут находиться в трёх физических состояниях: стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем.

Стеклообразное состояние – это твёрдое, аморфное. Атомы, входящие в состав молекулярной цепи, совершают колебательное движение около положения равновесия; при этом движения звеньев и перемещения макромолекул не происходит. Иными словами, в стеклообразном состоянии полимеры не обладают ни сегментальной, ни молекулярной подвижностью. К таким материалам относятся полимеры с пространственной структурой (реактопласты).

Высокоэластическое состояние характеризуется способностью материала к большим обратимым изменениям формы при небольших нагрузках. В этом состоянии колеблются звенья и макромолекула приобретает способность изгибаться.

В высокоэластическом состоянии полимеры похожи на жидкости с включёнными в них твёрдоподобными областями. Это состояние характеризуется высокой вязкостью и претерпевает вязко-упругую деформацию.

Вязкотекучее состояние напоминает жидкое состояние, но отличается от него очень большой вязкостью, поскольку подвижна вся молекула.

Полимеры существенно отличаются от металлов и сплавов: их молекулы вытянуты в длинные цепочки, в результате чего полимеры имеют высокую молекулярную массу. Молекулы полимеров получают из исходных низкомолекулярных продуктов – мономеров – полимеризацией и поликонденсацией. К полимерам поликонденсационного типа относятся фенолформальдегидные смолы, полиэфиры, полиуретаны, эпоксидные смолы. К высокомолекулярным соединениям полимеризационного типа относятся поливинилхлорид, полиэтилен, полистирол, полипропилен. Высокополимерные и высокомолекулярные соединения являются основой органической природы – животных и растительных клеток, состоящих из белка.

Для изготовления многих медицинских изделий широко применяют как полимерные материалы, в основе которых лежит природное сырьё, так и искусственные – синтетические и полимерные материалы. Из полимерных материалов естественного происхождения изготавливают большинство перевязочных средств: вату, марлю и изделия

из них, алигнин, а также нити шовных материалов (хирургический шёлк). Полимеры являются основой пластмасс, используемых при изготовлении различных инструментов, частей медицинской аппаратуры и оборудования.

Пластмассы: термопластичные, термореактивные, газонаполненные

Пластмассы – пластические массы – это материалы, полученные на основе высокомолекулярного органического соединения – полимера, выполняющего роль связующего и определяющего основные технические свойства материала.

Пластмассы – это органические вещества на основе полимеров. Они состоят из следующих компонентов.

1. *Связующее*. Связующее вещество является обязательным компонентом пластмассы, выполняющее функции основной матрицы. В качестве связующих для большинства пластмасс используют синтетические смолы (полимеры), реже применяют эфиры целлюлозы.

2. *Наполнители*. Это порошкообразные, волокнистые и другие низкомолекулярные вещества. Наполнители повышают механические свойства (твёрдость H_B , σ_B , σ_T), снижают усадку при прессовании и придают материалу те или иные специфические свойства.

Наполнители подразделяются:

- на порошковые (сажа, графит, древесная мука);
- волокниты (волокна, стекловолокна, асбоволокна);
- слоистые (бумага, ткань, стеклоткань);
- газовые (газонаполненные: поропласты, пенопласты, сотопласты);

Функции наполнителей выполняют также пластификаторы, отвердители, красители, стабилизаторы.

3. *Пластификаторы* – жидкие вещества, добавляемые для повышения эластичности материала;

4. *Отвердители* – вещества, приводящие к быстрому отверждению двухкомпонентной эпоксидной пластмассы;

5. *Красители* (обычно оксиды металлов), их вводят для изменения цвета пластмасс.

Свойства пластмасс зависят от состава отдельных компонентов, их сочетания и количественного отношения, что позволяет изменять характеристики пластиков в достаточно широких пределах.

Различают следующие разновидности пластмасс:

- термопластичные;
- термореактивные и газонаполненные.

К термореактивным пластмассам относятся: жёсткие пенополиуретаны, аминопласты и др. К газонаполненным пластмассам относятся пенополиуретаны – газонаполненный сверхлёгкий конструкционный материал.

Термопластичная пластмасса – полиэтилен низкого давления – продукт полимеризации этилена.

Аминопласты – термореактивные пластмассы – прессовочные карбамидо- и меламинаформальдегидные массы, получаемые на основе аминосмол с использованием наполнителей (органических, минеральных или их сочетания), окрашивающих и модифицирующих веществ.

Пенополиуретаны – газонаполненные пластмассы – сверхлёгкий конструкционный материал.

Свойства, состав и классификация пластмасс. Пластическими массами (пластмассами) называются материалы, получаемые на основе природных или синтетических полимеров. Пластмассы являются важнейшими современными конструкционными материалами. Они обладают рядом ценных свойств: малой плотностью (до 2 г/см³), высокой удельной прочностью, низкой теплопроводностью, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами, звукоизоляционными свойствами.

Некоторые пластмассы обладают оптической прозрачностью, фрикционными и антифрикционными свойствами, стойкостью к истиранию и др. Кроме того, пластмассы имеют хорошие технологические свойства: легко формуются, прессуются, обрабатываются резанием, их можно склеивать и сваривать. Недостатками пластмасс являются низкая теплостойкость, низкая ударная вязкость, склонность к старению для ряда пластмасс.

Основой пластмасс являются полимерные связующие вещества. Кроме связующих в состав пластмасс входят: наполнители для повышения прочности и придания специальных свойств; пластификаторы для повышения пластичности, что необходимо при изготовлении изделий из пластмасс; отвердители, ускоряющие переход пластмасс в неплавкое, твёрдое и нерастворимое состояние; стабилизаторы, предотвращающие или замедляющие процесс старения; красители.

По поведению при нагреве все пластмассы делятся на термопластичные и термореактивные. Термопластичные при неоднократном нагревании и охлаждении каждый раз размягчаются и затвердевают. Термореактивные при нагревании размягчаются, затем ещё до охлаждения затвердевают (вследствие протекания химических реакций) и при повторном нагревании остаются твёрдыми.

По виду наполнителя пластмассы делятся на порошковые, волокнистые, слоистые, газонаполненные и пластмассы без наполнителя.

По способу переработки в изделия пластмассы подразделяются на литьевые и прессовочные. Литьевые перерабатываются в изделия методами литьевого прессования и являются термопластичными. Прессовочные перерабатываются в изделия методами горячего прессования и являются термореактивными.

По назначению пластмассы делятся на конструкционные, химически стойкие, прокладочные и уплотнительные, фрикционные и антифрикционные, теплоизоляционные и теплозащитные, электроизоляционные, оптически прозрачные, облицовочно-декоративные и отделочные.

Слоистые пластмассы получают прессованием (или намоткой) слоистых наполнителей, пропитанных смолой. Они обычно выпускаются в виде листов, плит, труб, из которых механической обработкой получают различные детали.

Текстолит – это материал, полученный прессованием пакета кусков хлопчатобумажной ткани, пропитанной смолой. Обладает хорошей способностью поглощать вибрационные нагрузки, электроизоляционными свойствами. Теплостоек до 80 °С.

Стеклотекстолит отличается от текстолита тем, что в качестве наполнителя используется стеклоткань. Более прочен и теплостоек, чем текстолит, имеет лучшие электроизоляционные свойства. В асботекстолите наполнителем является асбестовая ткань. Кроме электроизоляционных, он имеет хорошие теплоизоляционные и фрикционные свойства.

Гетинакс представляет собой материал, полученный прессованием нескольких слоёв бумаги, пропитанной смолой. Он обладает электроизоляционными свойствами, устойчив к действию химикатов, может применяться при температуре до 120–140 °С.

Волокнистые пластмассы представляют собой композиции из волокнистого наполнителя, пропитанного смолой. Они делятся на волокниты, асбоволокниты и стекловолокниты.

В волокнитах в качестве наполнителя применяется хлопковое волокно. Они используются для относительно крупных деталей общетехнического назначения с повышенной стойкостью к ударным нагрузкам.

Стекловолокниты имеют в качестве наполнителя короткое стекловолокно или стеклонити. Прочность, электроизоляционные свойства и водостойкость стекловолокнитов выше, чем у волокнитов. Применяются для изготовления деталей, обладающих повышенной прочностью.

Порошковые пластмассы в качестве наполнителя используют органические порошки (древесная мука, порошкообразная целлюлоза) и минеральные порошки (молотый кварц, тальк, цемент, графит). Эти пластмассы обладают невысокой прочностью, низкой ударной вязкостью, электроизоляционными свойствами. Пластмассы с органическими наполнителями применяются для ненагруженных деталей общетехнического назначения – корпусов приборов, рукояток, кнопок. Минеральные наполнители придают порошковым пластмассам химическую стойкость, водостойкость, повышенные электроизоляционные свойства.

Рассмотренные выше пластмассы со слоистыми, волокнистыми и порошковыми наполнителями имеют чаще всего термореактивные связующие, хотя имеются пластмассы с термопластичными связующими.

Пластмассы без наполнителя чаще всего являются термопластичными материалами. Рассмотрим наиболее важные из них.

Полиэтилен $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ – продукт полимеризации бесцветного газа – этилена. Один из самых лёгких материалов (плотность $0,92 \text{ г/см}^3$), имеет высокую эластичность, химически стоек, морозостоек. Недостатки – склонность к старению и невысокая теплостойкость (до 60°C). Используется для изготовления плёнки, изоляции проводов, изготовления коррозионно-стойких труб, уплотнительных деталей. Занимает первое место в общем объёме производства пластмасс.

Органическое стекло – прозрачный термопластичный материал на основе полиакриловой смолы. Отличается высокой оптической прозрачностью, в 2 раза легче минеральных стёкол, обладает химической стойкостью. Недостатки – низкая твёрдость и низкая теплостойкость. Используется для остекления в автомобиле- и самолётостроении, для прозрачных деталей в приборостроении.

Фторопласты имеют наибольшую термическую и химическую стойкость из всех термопластичных полимеров. Фторопласт-4 $(-\text{CF}_2-\text{CF}_2)_n$ водостоек, не горит, не растворяется в обычных растворителях, обладает электроизоляционными и антифрикционными свойствами. Применяется для изготовления изделий, работающих в агрессивных средах при высокой температуре, электроизоляции и др.

Фторопласт-3 ($-\text{CF}_2-\text{CFC}_1-$)_n по свойствам и применению аналогичен фторопласту-4, уступая ему по термохимической стойкости и превосходя по прочности и твёрдости.

Газонаполненные пластмассы представляют собой материалы на основе синтетических смол, содержащие газовые включения. В пенопластах поры, заполненные газом, не соединяются друг с другом и образуют замкнутые объёмы. Они отличаются малой плотностью ($0,02 \dots 0,2 \text{ г/см}^3$), высокими тепло-, звуко- и электроизоляционными свойствами, водостойкостью. Недостатки пенопластов – низкая прочность и низкая теплостойкость (до 60°C). Используются для теплоизоляции и звукоизоляции, изготовления непотопляемых плавучих средств, в качестве лёгкого заполнителя различных конструкций. Мягкие виды пенопластов используются для изготовления мебели, амортизаторов и т.п.

Поропласты – это газонаполненные пластмассы, поры которых сообщаются между собой. Их плотность составляет $0,02 \dots 0,5 \text{ г/см}^3$. Они представляют собой мягкие эластичные материалы, обладающие водопоглощением.

Резиновые материалы

Резины различных видов и марок относятся к группе эластичных материалов – эластомеров. Резины подразделяются на формовые и неформовые. К неформовым относится большая группа так называемых сырых резин. Сырые резины выпускаются под номерами (10, 11, 14 и т.д.) в виде разнотолщинных пластин, покрытых тальком (для предохранения от слипания), или в виде рулонов с тканевой прокладкой (измиткаля), которая также предохраняет резину от слипания.

Неформовая сырая резина получается путём вулканизации из резиновых смесей, изготавливаемых на основе синтетических каучуков или натурального. Основным вулканизирующим веществом является сера, но еще применяют селен и теллур. В зависимости от марок сырая резина используется для получения различных формовых изделий с определёнными свойствами.

Резина представляет собой искусственный материал, получаемый в результате специальной обработки резиновой смеси, основным компонентом которой является каучук. Каучук – это полимер, отличительной особенностью которого является способность к очень большим обратимым деформациям при небольших нагрузках. Это свойство объясняется строением каучука. Его макромолекулы имеют вытянутую извилистую форму. При нагрузке происходит выпрямление

макромолекул, что и объясняет большие деформации. При разгрузке макромолекулы принимают исходную форму. Различают натуральный и синтетический каучук. Натуральный каучук добывают из некоторых видов тропических растений в незначительных количествах. Поэтому производство резины основано на применении синтетических каучуков. Сырьём для производства синтетического каучука служит спирт, на смену которому приходит нефтехимическое сырьё.

Резину получают из каучука путём вулканизации, т.е. в процессе химического взаимодействия каучука с вулканизатором при высокой температуре, вулканизатором чаще всего является сера. В процессе вулканизации сера соединяет нитевидные молекулы каучука и образуется пространственная сетчатая структура.

Основное свойство резины – очень высокая эластичность. Резина способна к большим деформациям, которые почти полностью обратимы. Кроме того, резина характеризуется высоким сопротивлением разрыву и истиранию, газо- и водонепроницаемостью, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами, небольшой плотностью, малой сжимаемостью, низкой теплопроводностью.

По назначению резины подразделяются на резины общего и специального назначения. Из резин общего назначения изготавливаются автомобильные шины, транспортёрные ленты, ремни ременных передач, изоляция кабелей, рукава и шланги, уплотнительные и амортизационные детали, обувь и др. Резины общего назначения могут использоваться в горячей воде, слабых растворах щелочей и кислот, а также на воздухе при температуре от -10 до $+150$ °С. Резины специального назначения подразделяются на теплостойкие, которые могут работать при температуре до $250...350$ °С; морозостойкие, выдерживающие температуру до -70 °С; маслобензостойкие, работающие в среде бензина, других топлив, масел и нефтепродуктов; светоозоностойкие, не разрушающиеся при работе в атмосферных условиях в течение нескольких лет, стойкие к действию сильных окислителей; электроизоляционные, применяемые для изоляции проводов и кабелей; электропроводящие, способные проводить электрический ток.

Лекция 9. Композиционные материалы

Композиционные материалы – сложные или составные материалы, состоящие из двух разнородных материалов (например: стекла и пластмассы – стеклопластики), принято классифицировать по типу структуры, материалу матрицы, назначению и способу изготовления.

Развитие авиации, ракетно-космической техники, ядерной энергетики и многих других отраслей промышленности, а также задача повышения качества выпускаемых изделий потребовали создания новых конструкционных материалов.

Материалы характеризуются высокими прочностью, термостойкостью и жаропрочностью, малой плотностью, теплопроводностью и электропроводимостью, диэлектрическими, магнитными и другими специальными физическими свойствами. Объединение различных ценных свойств отдельных материалов позволило создать единое целое – **композицию**.

Композицию получают путём введения в основной материал (матрицу) определённого количества другого материала, который добавляется в целях получения специальных свойств.

Композиционными называют сложные материалы в состав которых входят отличающиеся по свойствам, не растворимые друг в друге компоненты. Основой композиционных материалов является сравнительно пластичный материал – компонент, непрерывный во всём объёме композиционного материала, называемый **матрицей**. В матрице равномерно распределены более твёрдые и прочные вещества, называемые упрочнителями или наполнителями. Матрица может быть металлической, полимерной, углеродной, керамической. По типу упрочнителя композиционные материалы делятся на дисперсно-упрочнённые, в которых упрочнителем служат дисперсные частицы оксидов, карбидов, нитридов и др., волокнистые, в которых упрочнителем являются волокна различной формы, и слоистые, состоящие из чередующихся слоёв волокон и листов матричного материала.

Композиционные материалы – искусственно созданные материалы, которые состоят из двух или более компонентов, различающихся по составу, и которые имеют новые свойства, запроектированные заранее.

Компонент прерывистый, разделённый в объёме композиционного материала, называется **арматурой**.

Матрица придаёт требуемую форму изделию, влияет на создание свойств композиционного материала, защищает арматуру от механических повреждений и других воздействий среды.

В качестве матриц в композиционных материалах могут быть использованы металлы и их сплавы, полимеры органические и неорганические, керамические, углеродные и другие материалы.

Свойства матрицы определяют технологические параметры процесса получения композиции и её эксплуатационные свойства: плотность, удельную прочность, рабочую температуру, сопротивление усталостному разрушению и воздействию агрессивных сред.

В последнее время находят широкое применение так называемые гибридные КМ. Гибридными называют КМ, содержащие в своём составе три или более компонентов.

По назначению КМ разделяют на общеконструкционные, термостойкие, пористые, фрикционные и антифрикционные и т.д.

Все КМ условно можно классифицировать по следующим признакам; материалу композиции, типу арматуры и её ориентации, способу получения композиции и изделий из них, по назначению.

Свойства КМ в основном зависят от физико-механических свойств компонентов и прочности связи между ними.

Практически всякий современный материал представляет собой композицию, поскольку материалы редко используются в чистом виде.

Физико-механические свойства КМ в зависимости от концентрации компонентов, их геометрических параметров и ориентации, а также технологии изготовления могут меняться в очень широких пределах. Тем самым открывается возможность специального создания (конструирования) материала с заданными свойствами для определённого изделия.

Отличительной особенностью КМ является то, что в них проявляются достоинства компонентов, а не их недостатки. Созданы КМ с комбинированными матрицами, состоящими из чередующихся слоёв различного химического состава. Поскольку главную роль в упрочнении КМ играют наполнители (компоненты), их часто называют упрочнителями.

Основная функция наполнителя – обеспечить прочность и жёсткость КМ.

Частицы наполнителя должны иметь высокую прочность во всём интервале температур, малую плотность, быть нерастворимыми в матрице и нетоксичными. Армирующими свойствами в КМ являются оксиды, карбиды (обычно – карбид кремния SiC), нитрид кремния (Si_3N_4), стеклянные или вольфрамовая проволока.

По форме наполнителя КМ разделяют на дисперсно-упрочнённые, слоистые и волокнистые.

Дисперсно-упрочнёнными называют КМ, упрочнённые нульмерными наполнителями (наполнители, имеющие в трёх измерениях очень малые размеры одного порядка (частицы 1 (рис. 26, п. 1))); волокнистыми – КМ, упрочнённые одномерными (имеют малые размеры в двух направлениях и значительно превосходящий их размер в

третьем измерении (рис. 26, п. 2)) или одномерными и двумерными наполнителями (у двумерных наполнителей два размера соизмеримы с размером КМ и значительно превосходят третий (рис. 26, п. 3)); слоистые – КМ, упрочнённые двумерными наполнителями.

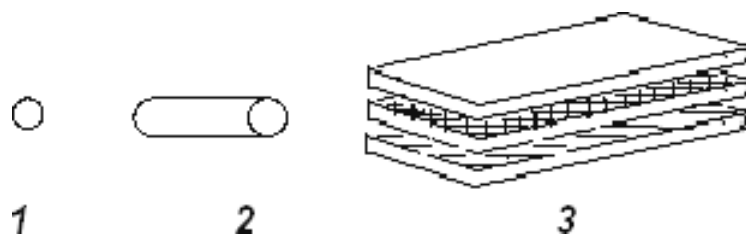


Рис. 26. Разновидности КМ

Среди дисперсноупрочнённых материалов ведущее место занимает САП (спечённая алюминиевая пудра), представляющий собой алюминий, упрочнённый дисперсными частицами оксида алюминия. Получают САП из окисленной с поверхности алюминиевой пудры путём последовательного брикетирования, спекания и прессования. Структура САП состоит из алюминиевой основы с равномерно распределёнными частицами Al_2O_3 . С увеличением содержания Al_2O_3 повышается прочность, твёрдость, жаропрочность САП, но снижается его пластичность. Марки САП-1, САП-2, САП-3, САП-4 содержат, соответственно, 6...8, 9...12, 13...17, 18...22 % Al_2O_3 . Высокая прочность САП объясняется большой дисперсностью упрочнителя и малым расстоянием между его частицами. По жаропрочности САП превосходит все алюминиевые сплавы.

В волокнистых композиционных материалах упрочнителем служат углеродные, борные, синтетические, стеклянные и другие волокна, нитевидные кристаллы тугоплавких соединений (карбиды кремния, оксиды алюминия и др.) или металлическая проволока (стальная, вольфрамовая и др.). Свойства материала зависят от состава компонентов, количественного соотношения и прочности связи между ними. Для металлических композиционных материалов прочная связь между волокном и матрицей достигается благодаря их взаимодействию. Связь между компонентами в композиционных материалах на неметаллической основе осуществляется с помощью адгезии. Повышение адгезии волокон к матрице достигается их поверхностной обработкой. Производится осаждение нитевидных кристаллов на поверхность волокон. При этом получают «мохнатые» волокна с улучшенной адгезией, благодаря чему улучшаются механические свойства композиционного материала.

Среди неметаллических волокнистых композиционных материалов наибольшее распространение получили материалы с полимерной матрицей. Материалы, содержащие в качестве упрочнителя углеродные волокна, называются карбоволокнами. Они обладают низкими теплопроводностью и электропроводностью, хорошей износостойкостью. Недостаток карбоволокнитов – низкая прочность при сжатии и сдвиге. Материалы с упрочнителем в виде волокон бора называют бороволокнами. Они характеризуются высокой прочностью при растяжении, сжатии и сдвиге, высокими твёрдостью и модулем упругости, тепло- и электропроводностью. Материалы, содержащие в качестве упрочнителя синтетические волокна (капрон, лавсан и др.), называются органоволокнами. Они обладают высокой удельной прочностью в сочетании с хорошей пластичностью и ударной вязкостью, электроизоляционными свойствами.

Волокнистые композиционные материалы на металлической основе имеют более высокие характеристики, зависящие от свойств матрицы. В качестве матрицы используются металлы, имеющие небольшую плотность (алюминий, магний, титан), их сплавы, а также никель для создания жаропрочных материалов. В качестве упрочнителя используют стальную проволоку (наиболее дешёвый материал), борные и углеродные волокна. При создании жаропрочных композиционных материалов на основе никеля используется вольфрамовая проволока.

Материалы порошковой металлургии

Порошковая металлургия – область техники, охватывающая процессы получения порошков металлов и металлоподобных соединений и процессы изготовления изделий из них без расплавления. Характерной особенностью порошковой металлургии является применение исходного материала в виде порошков, из которых прессованием формируются изделия заданной формы и размеров. Полученные заготовки подвергаются спеканию при температуре ниже температуры плавления основного компонента.

Наибольшее практическое применение имеют способы механического измельчения исходного сырья (стружки, обрезков, скрипа и т.д.). Измельчение проводят в механических мельницах. Размолом получают порошки из легированных сплавов строго заданного химического состава и из хрупких материалов, таких как кремний, бериллий и др.

При применении **механических способов** исходный продукт измельчается без изменения химического состава. К недостаткам механического измельчения следует отнести высокую стоимость порошков, включающую стоимость изготовления исходных литых металлов и сплавов, и относительно низкую производительность процесса.

К **физико-химическим способам** получения порошков относят восстановление оксидов, осаждение металлического порошка из водного раствора соли и др. Получение порошка связано с изменением химического состава исходного сырья или его состояния в результате химического или физического (но не механического) воздействия на исходный продукт. Физико-химические способы получения порошков в целом более универсальны, чем механические.

Поведение металлических порошков при прессовании и спекании зависит от свойств порошков, которые, в свою очередь, определяются методами и способами их получения.

Свойства порошковых материалов

Металлические порошки характеризуются *химическими, физическими и технологическими* свойствами.

Химические свойства порошков зависят от содержания основного металла или основных компонентов, входящих в состав комплексных порошков, а также от содержания примесей, различных механических загрязнений и газов. Также важными химическими особенностями порошков являются их воспламеняемость, взрываемость и токсичность.

Воспламеняемость порошка связана с его способностью к самовозгоранию при соприкосновении с окружающей атмосферой, которая при относительно невысоких температурах может привести к воспламенению порошка или даже взрыву. Воспламеняемость порошка зависит от того, находится ли он в свободно насыпанном состоянии (в виде аэрогеля) или в виде взвеси в окружающей атмосфере (в виде аэрозоля). Для аэрогелей определяют температуры самонагревания, тления, самовоспламенения, а также энергию воспламенения.

Взрываемость порошка. Сверхвысокие скорости химического взаимодействия порошка с кислородом приводят почти к мгновенному выделению энергии, которое сопровождается образованием и распространением взрывной волны (происходит взрыв).

Токсичность порошка. Практически пыль любого из металлов, в том числе и совершенно безвредных в компактном состоянии, воздействует на человека и может вызвать патологические изменения в

его организме, фиброгенные и аллергические заболевания. Степень опасности для здоровья человека металлических пылей зависит от их химического состава и степени окисленности, размера частиц, их концентрации, длительности воздействия, путей проникновения в организм и т.д. Технологические и санитарно-технические мероприятия должны поддерживать в производственных помещениях концентрацию пыли на уровне ниже нормы ПДК.

К **физическим свойствам** порошка относятся форма и размер частиц, гранулометрический состав, удельная поверхность частиц, пикнометрическая² плотность и микротвёрдость.

Форма и размер частиц. В зависимости от химической природы металла и способа получения частицы порошка могут иметь различную форму – сферическую (карбонильные), каплеобразную (распылённые порошки), губчатую (восстановленные), тарельчатую (при размоле в вихревых мельницах), дендритную (электролитические), осколочную (при размоле в шаровых и вибромельницах), волокнистую и лепесткововидную (получение при плющении).

Форма частиц порошков оказывает большое влияние на насыпную плотность и прессуемость, а также на плотность, прочность и однородность прессовок.

Под **технологическими свойствами** порошков понимается их насыпная плотность, текучесть, уплотняемость, спекаемость, прессуемость и формуемость.

Насыпная плотность порошка – масса единицы объёма порошка при свободной насыпке. Насыпная плотность выражает способность порошка к укладке и зависит от плотности металла (сплава) и фактического заполнения порошком объёма. Плотность укладки частиц порошка в объёме определяется его дисперсностью, формой и удельной поверхностью частиц.

Текучесть – способность порошка заполнять форму. Текучесть ухудшается с уменьшением размеров частиц порошка и повышением влажности. Текучесть оценивают количеством порошка, вытекаемого через отверстие диаметром 1,5–4 мм в секунду. Текучесть порошка имеет большое значение, особенно при автоматическом прессовании, где производительность пресса зависит от скорости заполнения формы. Низкая текучесть способствует также получению неоднородных по плотности заготовок.

² **Пикнóметр** (от др.-греч. πυκνός – «плотный» и μέτρον – «измеряю») – физико-химический прибор, стеклянный сосуд специальной формы и определённой вместимости, применяемый для измерения плотности веществ, в газообразном, жидком и твёрдом состояниях.

Уплотняемость – способность уменьшать занимаемый объём порошкового материала под воздействием давления или вибрации. По стандарту эта характеристика оценивается по плотности прессовок, изготовленных при давлениях прессования в цилиндрических прессформах с заданным диаметром.

Прессуемость характеризуется способностью порошка уплотняться под действием внешней нагрузки и прочностью сцепления частиц после прессования. Прессуемость порошка зависит от пластичности материала частиц, их размеров и формы и повышается с введением в его состав поверхностно-активных веществ.

Под **спекаемостью** понимают прочность сцепления частиц в результате термической обработки прессованных заготовок.

Для приготовления шихты дозированные порции порошков определённого химического и гранулометрического состава и технологических свойств смешивают в барабанах, мельницах и других смешивающих устройствах. При необходимости особо тщательного и равномерного перемешивания шихты применяют добавки спирта, бензина, глицерина и дистиллированной воды. Иногда в процессе смешивания вводят технологические присадки различного назначения: пластификаторы, облегчающие прессование (парафин, стеарин, глицерин и др.), легкоплавкие присадки, летучие вещества, позволяющие получать изделия с заданной пористостью.

Формообразование осуществляется прессованием (холодное, горячее, мундштучное, гидростатическое), прокаткой и суспензионным (шликерным) литьём.

При холодном прессовании в матрицу прессформы засыпают приготовленную шихту и производят прессование пуансоном. После снятия давления изделие выпрессовывают из матрицы пуансоном, при этом матрицу устанавливают на подкладное кольцо. В процессе прессования частицы порошка подвергаются упругой и пластической деформациям, резко увеличивается контакт между частицами порошка и уменьшается пористость, что даёт возможность получить заготовку нужной формы и достаточной прочности.

Прессование производят на гидравлических или механических прессах. Наиболее широко применяют гидравлические прессы, так как они обеспечивают достаточно высокое давление и плавное уплотнение шихты при сравнительно малых скоростях движения пуансона. С увеличением скорости движения пуансона плотность изделия уменьшается. Давление прессования может быть снижено при использовании вибрационного прессования или прессования в вакууме. Рабочие поверхности прессформ шлифуют или полируют.

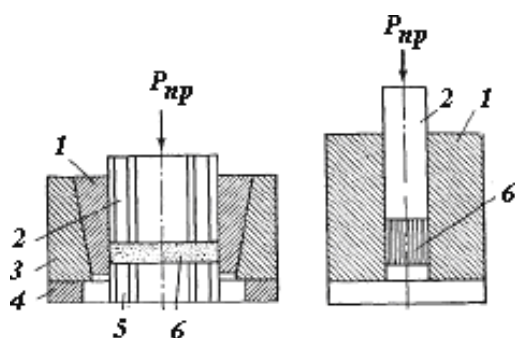


Рис. 27. Разъёмная (а) и неразъёмная (б) прессформы для одностороннего прессования:
1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – обойма;
4 – подкладка; 5 – нижний пуансон;
6 – заготовка

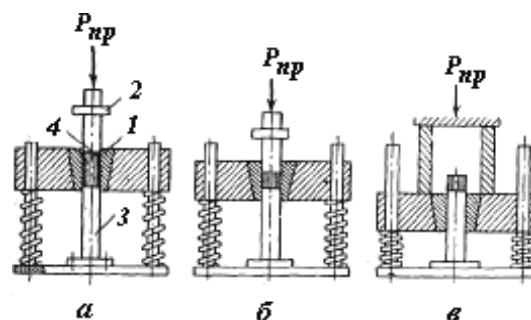


Рис. 28. Двустороннее прессование:
а – начало; б – конец;
в – выпрессовка; 1 – матрица;
2 – верхний пуансон;
3 – нижний пуансон; 4 – заготовка

В зависимости от сложности и конфигурации изделия применяют разъёмные и неразъёмные прессформы с односторонним или двусторонним прессованием. Одностороннее прессование применяют для изделий простой формы.

При прессовании изделий большей высоты применяют двустороннее прессование (рис. 28), обеспечивающее равномерную плотность прессуемого изделия и снижение давления прессования на 30–40 % по сравнению с односторонним прессованием.

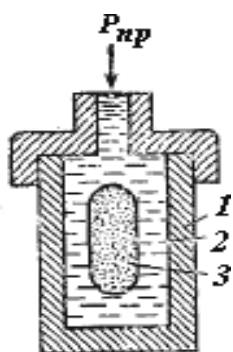


Рис. 29. Схема гидростатического прессования:

1 – контейнер; 2 – пуансон;
3 – мунштук; 4 – заготовка

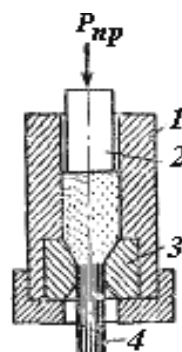


Рис. 30. Схема мунштучного прессования:

1 – герметизированный цилиндр;
2 – оболочка; 3 – порошок

При горячем прессовании в прессформе изделие не только формируется, но и подвергается спеканию, что позволяет получать беспористый материал с высокими физико-механическими свойствами. Горячее прессование можно осуществлять в вакууме, в защитной или

восстановительной атмосфере, в широком интервале температур (1200–1800 °С) и при более низких давлениях, чем холодное прессование. Приложение давления обычно производится после нагрева порошков до требуемой температуры. Этим методом получают изделия из трудно деформируемых материалов (боридов, карбидов и др.). Гидростатическое прессование порошка, заключённого в резиновую или металлическую пластичную оболочку, происходит под давлением жидкости (масла, эмульсии, воды). Источником внешнего давления в жидкости может быть электростатический разряд или взрыв. Методом гидростатического прессования можно получать изделия равномерной плотности, простой формы (трубы, цилиндры, шары и др.) и значительных габаритов.

При мундштучном прессовании смесь порошка с пластификаторами выдавливается через мундштук матрицы. Пластификаторами служат растворы парафина, бакелита и других в количестве 6–12 %. Мундштучным прессованием получают изделия большой длины и равномерной плотности из труднопрессуемых порошков вольфрама, бериллия, урана, циркония и др.

Прокатка металлических порошков является непрерывным процессом получения изделий в виде лент, проволоки, полос путём

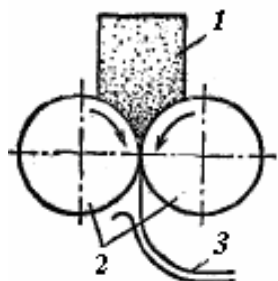


Рис. 31. Схема прокатки порошков:

1 – бункер с порошком; 2 – валки;
3 – лента

деформирования в холодном или горячем состоянии. Прокатку производят в вертикальном, наклонном и горизонтальном направлениях. Наилучшие условия формообразования изделия создаются при вертикальной прокатке. Сначала порошок из бункера поступает в зазор между вращающимися обжимными валками и прессуется в заготовку, которая направляется в печь для спекания, а затем про-

катывается в чистовых валках. Прокаткой можно получать однослойные и многослойные изделия. Непрерывность процесса обеспечивает высокую производительность и возможность автоматизации.

Суспензионное (шликерное) литьё применяют для получения тонкостенных изделий сложной формы с внутренними полостями, которые не могут быть получены другими методами. Специальную водную суспензию с содержанием 40–70 % порошка (шликер) с размерами частиц не более 5–10 мкм заливают в пористую гипсовую или

керамическую форму. Суспензионная жидкость впитывается пористыми стенками формы, а порошок осаждается на стенках, образуя тонкостенную заготовку. Связь частиц порошка в изделии обеспечивается их механическим сцеплением. После сушки заготовку извлекают, предварительно разрушив форму. Шликер на поверхность формы может также наноситься напылением, разбрызгиванием и другими способами. Шликерное литьё обычно используют для получения изделий из хрупких и твёрдых порошков различных карбидов, силицидов, нитридов и др.

Изделия, полученные вышеперечисленными методами, не обладают необходимой прочностью вследствие присутствия на поверхности частиц порошков окислов и других загрязнений. Для придания изделиям необходимой прочности и твёрдости их подвергают спеканию. Операция спекания состоит в нагреве и выдержке изделий при температуре, примерно равной 0,6–0,9 абсолютной температуры плавления основного компонента, при средней длительности выдержки 1–2 ч. Спекание производят в электрических печах сопротивления, индукционным нагревом или путём непосредственного пропускания тока через спекаемое изделие. Для предотвращения окисления металлических порошков спекание ведут в аргоне, гелии, в вакууме или в среде водорода. Для придания изделиям окончательной формы и точных размеров готовые изделия после спекания могут подвергаться термической и химико-термической обработке, обработке резанием и размерной обработке физико-химическими методами.

Методы изготовления порошковых материалов

Порошковый материал – совокупность частиц металла, сплава или металлоподобного соединения с размерами до 1 мм, находящихся во взаимном контакте и не связанных между собой.

Металлические порошки характеризуются их химическим составом, а также физическими и технологическими свойствами. Химический состав порошков определяется содержанием основного металла или компонента и примесей. Физические свойства порошков определяются размером и формой частиц, микротвёрдостью, плотностью, состоянием кристаллической решётки.

Порошковой металлургией получают различные конструкционные материалы для изготовления заготовок и готовых деталей.

Основными достоинствами технологии производства изделий методом порошковой металлургии являются:

- 1) возможность изготовления деталей из тугоплавких металлов и соединений, когда другие методы использовать невозможно;
- 2) значительная экономия металла за счёт получения изделий высокой точности, в минимальной степени нуждающихся в последующей механической обработке (отходы составляют не более 1...3 %);
- 3) возможность получения материалов максимальной чистоты;
- 4) простота технологии порошковой металлургии.

Методом порошковой металлургии изготавливают твёрдые сплавы, пористые материалы: антифрикционные и фрикционные фильтры; электропроводники, конструкционные детали, в том числе работающие при высоких температурах и в агрессивных средах.

Все сыпучие тела состоят из частиц и межчастичных (внешних) пор. Частицы порошков, в свою очередь, могут подразделяться на более мелкие структурные элементы. Металлические частицы практически всегда содержат примеси, распределённые как по поверхности, так и в виде внутренних включений, и часто имеют внутричастичные поры.

Частицы могут иметь самую разнообразную форму. Можно подразделить различные структуры на три основные группы:

- волокнистые или игольчатые частицы, длина которых значительно превышает их размер по другим измерениям;
- плоские частицы (пластинки, листочки, таблицы), длина и ширина которых во много раз больше толщины;
- равноосные частицы с примерно одинаковыми размерами по всем измерениям.

Частицы отделены одна от другой порами (межчастичными) и контактными промежутками.

Производство порошка – первая технологическая операция метода порошковой металлургии. Существующие способы получения порошков весьма разнообразны – это делает возможным придание изделиям из порошка требуемых физических, механических и других свойств. Выделяют два способа получения порошков: физико-химические и механические.

К физико-химическим методам относят технологические процессы производства порошков, связанные с глубокими физико-химическими превращениями исходного сырья. В результате полученный

порошок по химическому составу существенно отличается от исходного материала. К физико-химическим методам относятся: электролиз, термическая диссоциация карбонильных соединений, восстановление оксидов твёрдыми восстановителями и газами, метод испарения и конденсации и др.

Под механическими методами получения порошков понимают технологические процессы, при которых в результате действия внешних механических сил исходный металл измельчается в порошок без изменения его химического состава. Чаще всего используется измельчение твёрдых материалов в мельницах различных конструкций. К механическим методам относят: измельчение металла резанием, размол в шаровых мельницах, измельчение в вихревых мельницах, дробление в инерционных дробилках, распыление струи жидкого металла паром, водой, сжатым газом.

Получение металлических порошков путём восстановления из оксидов является наиболее распространённым, высокопроизводительным и экономичным методом.

Восстановление – процесс получения металла, материала, вещества или их соединений путём отнятия неметаллической составляющей (кислорода или солевого остатка) из исходного химического соединения.

Более универсальными являются физико-химические методы, но в практике порошковой металлургии чёткой границы между двумя методами получения порошка нет. Чаще всего в технологическую схему производства порошка включаются отдельные операции как механических, так и физико-химических методов получения порошка.

Рекомендуемая литература

1. Черепяхин, А.А. Материаловедение [Электронный ресурс]: учебник / Черепяхин А.А., Смолькин А.А. - М.:КУРС, ИНФРА-М, 2016. - 288 с. - ЭБС «Znanium. com» - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=550194>
2. Сироткин, О.С. Основы современного материаловедения [Электронный ресурс]: учебник/О.С.Сироткин - М.: ИНФРА-М, 2015. - 364 с. - ЭБС «Znanium. com» - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=432594>
3. Структура и свойства неметаллических материалов [Электронный ресурс]: Учебное пособие / Г.В. Пачурин и др.; под общ. ред. Г.В. Пачурина. - М.: Форум: ИНФРА-М, 2015. - 104 с. - ЭБС «Znanium. com» - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=492513>
4. Горохов, В.А. Материалы и их технологии. В 2 ч. Ч. 1 [Электронный ресурс]: учебник/ В.А. Горохов, Н.В. Беяков, А.Г. Схиртладзе; под ред. В.А. Горохова. - М.: ИНФРА-М;Мн.:Нов.знание, 2014. - 589 с. - ЭБС «Znanium. com» - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=446097>
5. Материалы и их технологии. В 2 ч. Ч. 2 [Электронный ресурс]: учебник / В.А. Горохов и др; под ред. В.А. Горохова. - М.: ИНФРА-М; Мн.: Нов. знание, 2014. - 533 с. - ЭБС «Znanium. com» - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=446098>

