

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Современные знания науки о материалах — это результат теоретических и экспериментальных исследований, инженерных разработок, изобретений и открытий, накопленных поколениями наших предшественников, которые от Античности до наших дней возводили здание современного материаловедения.

Наука о материалах основывается на фундаменте физики, химии, механики, а также прикладных наук: металловедения, черной, цветной и порошковой металлургии, знаний о композитах, покрытиях, пленках, керамических материалах, синтетических монокристаллах, а также о технологиях получения материалов и изделий из них.

Достаточно вспомнить, что древняя история человечества неразрывно связана с открытием, использованием и технологиями обработки камня, дерева, металла. Это и определило название отдельных эпох — каменный век, бронзовый век.

В Средние века лучшие умы Европы находились под влиянием ложных представлений, порожденных алхимией. В то же время на Востоке эпоха Средневековья была отмечена открытием фарфора в Китае (620), а индийские и иранские металлурги разработали технологии получения высококачественной дамасской стали.

В эпоху Возрождения (XV–XVII вв.) вновь возник интерес к получению металлов и сплавов. Это время породило плеяду великих ученых-естествоиспытателей, которые отрицали идеи алхимиков, приступили к строительству на фундаменте эксперимента современных научных знаний в материаловедении.

Среди многих наиболее значимых личностей этой эпохи, внесших большой вклад в науку о материалах, следует вспомнить:

- Ваноччо Берингуччо, итальянского металлурга-литейщика, автора 10-томного сочинения «Пиротехния»;
- Роберта Гука, английского механика и естествоиспытателя, открывшего один из фундаментальных законов сопротивления материалов — закон пропорциональности между силой, приложенной к упругому телу, и его деформацией;
- Роберта Бойля, английского физика и химика; и многих других.

Рациональный XVIII в. принес множество открытий в области фундаментальных наук, в первую очередь математики, механики, физики, химии и технологических разработок в металлургии, керамическом производстве, стеклоделии.

В области практического материаловедения была создана промышленная технология выплавки чугуна путем замены древесного угля каменноугольным коксом, разработан пудлинговый процесс получения железа.

XIX в. — время бурного развития науки и технологий. Начало и конец этого периода отмечены выдающимися событиями, тесно связанными с наукой о материалах. В 1802 г. Петровым было открыто явление электрической дуги, возникающей между двумя угольными электродами, впоследствии получившее развитие в создании источников света, электросварке и электрометаллургии.

Конец века ознаменовался открытием радиоактивности (А. Беккерель, П. и М. Кюри), которая в наступающем XX в. стала основой ядерной физики и науки о радиоактивных материалах.

Заложены основы теории упругости и пластичности твердых тел (Т. Юнг, С. Пуассон, В. Кирпичев и др.).

В области теоретической и прикладной химии были сделаны следующие открытия:

1) предложена молекулярная и атомистическая модели строения вещества (А. Авогадро, Д. Дальтон);

2) открыт периодический закон химических элементов (Д. И. Менделеев);

3) создана химическая термодинамика равновесных процессов (Дж. У. Гиббс, Г. Гельмгольц, У. Т. Томсон, Р. Ю. Клаузиус, Я. Х. Вант-Гофф, В. Нернст, Н. Н. Бекетов, А. Л. Ле-Шателье);

4) разработана теория химической кинетики (С. Аррениус, В. Нернст, В. Оствальд);

5) открыты и получены химические элементы, неизвестные ранее;

6) созданы методы спектрального (Р. В. Бунзен, Г. Р. Кирхгоф) и химического (Г. Розе) элементного анализа;

7) разработаны теоретические принципы термохимии (Н. Н. Бекетов, Г. И. Гесс, П.-Э. Бертло, Х. Томсен);

8) созданы методы высокотемпературной химии (Й. Я. Берцелиус, Ф. Велер, А. Муассон), позволяющие синтезировать тугоплавкие соединения (бориды, нитриды, карбиды, оксиды, силициды) впоследствии ставшие основой конструкционной и функциональной керамики;

9) открыты теоретические основы электрохимии (М. Фарадей, Р. Клаузиус, Ф. Кольрауш), на их основе разработаны процессы гальванопластики, электрофореза и получения гальванических покрытий, а также методы и технологии получения металлов электролизом расплавов.

В области прикладного материаловедения были сделаны следующие открытия:

1) создан современный вариант доменного процесса производства чугуна (Э. А. Каупер, М. К. Курако, В. К. Мирецкий);

2) разработаны основные металлургические процессы производства стали путем передела жидкого чугуна в регенеративных печах (Ф. Сименс, К. В. Сименс, П. Мартен) и конвертерах (Г. Бессемер, С. Д. Томас, В. Е. Грум-Гржимайло);

3) созданы методы термической и термохимической обработки с целью получения высококачественных конструкционных и инструментальных углеродистых сталей (П. П. Аносов, С. И. Бадаев, И. Х. Гамель, А. Крупп, П. М. Обухов, К. П. Поленов, К. П. Пятов);

4) разработаны научные основы металловедения, включая представления о фазовых превращениях в сталях, позволяющие оптимизировать режимы термической обработки сталей; построена диаграмма состояния железо — углерод (Д. К. Чернов, Н. В. Калакуцкий, А. А. Ржешотарский);

5) предложены первые марки легированных сталей (Р. А. Гадфильд, Р. Ф. Мюшет);

6) создано оборудование и технология прокатки бесшовных труб (М. Маннесман, Р. Маннесман);

7) разработаны методы порошковой металлургии для получения ковкой платины (У. Х. Волластон, П. Г. Соболевский, В. В. Любарский);

8) созданы электротермические технологии и оборудование: электроплавка в дуговых печах (П. Эру, Э. Стассано); электросварка, резка и наплавка металлов (Н. Н. Бенардос, Н. Г. Славянов); печи сопротивления и технологии получения искусственного графита и карбида кремния (Э. Ачесон);

9) разработаны технологии получения высококачественного оптического и химически стойкого стекла (Ф. О. Шотт).

Российские ученые сыграли ведущую роль в развитии металловедения и материаловедения. Одним из них является П. П. Аносов, который в 1831 г. впервые применил микроскоп в разработке методики исследования строения стали. В 1868 г. Д. К. Чернов открытием критических точек в стали установил подлинно научную основу изменения ее свойств при термической обработке, за что получил международное признание.

В 1900 г. на Всемирной выставке в Париже известный французский металлург Г. Монгольфье сказал: «Считаю своим долгом открыто и публично заявить в присутствии стольких знатоков и специалистов, что наши заводы и все сталелитейное дело обязаны настоящим успехом в значительной мере трудам и исследованиям русского инженера Д. К. Чернова, и приглашаю всех выразить ему нашу признательность и благодарность от имени всей металлургической промышленности». В 1903 г. вышла книга американского металлурга Хоу со следующим посвящением: «Профессору Дмитрию Константиновичу Чернову, отцу металлургии железа».

В XIX в. были сделаны не только основополагающие открытия, заложившие фундамент современного материаловедения, но и созданы научные школы, начали издаваться специализированные научные журналы, способствовавшие обмену идеями и результатами исследований. С учетом важности результатов работ в области материаловедения наметилось лидерство таких стран, как Россия, Великобритания, Германия, Франция, Швеция.

XX в. — эпоха революционных открытий в области фундаментальных наук и технологий. Начало XX в. было ознаменовано появлением нескольких выдающихся теоретических работ, изменивших мировоззрение и повлиявших на дальнейшее развитие науки. Речь идет в первую очередь о теории относительности и законе взаимосвязи массы и энергии А. Эйнштейна, открывших пути создания ядерных технологий.

К основополагающим научным направлениям XX в., определяющим прогресс материаловедения и в наступившем XXI в., относятся:

- квантовая теория твердого тела, теория реальных кристаллов и физика дефектов в твердом теле;
- теория и экспериментальные достижения квантовой электроники;
- теория сверхпроводимости и сверхпроводящие материалы;

- металлургия тугоплавких, легких, жаропрочных, прецизионных и электротехнических сплавов;
- порошковая металлургия;
- физико-химия и технология радиоактивных материалов;
- материаловедение полупроводников, диэлектриков, магнетиков;
- физико-химия и технология оптических материалов;
- материаловедение композитов;
- химия и материаловедение полимеров;
- физико-химия и технология соединения разнородных материалов (сварка, склеивание и т. д.);
- химия твердого тела, химия и физика поверхности, теория и практика гетерогенного катализа;
- физико-химия и технология сверхчистых материалов, монокристаллов, тонких пленок, аморфных, аморфно-кристаллических, квазикристаллических, градиентных и направленно кристаллических материалов и покрытий;
- экстремальные технологии в материаловедении: высокие давления, глубокий вакуум, импульсные воздействия, воздействие мощных энергетических потоков на материалы (плазма, лазерное излучение, электронный и плазменно-дуговой нагрев и перегрев, ионная имплантация и др.);
- нанотехнологии в материаловедении;
- компьютерное моделирование в материаловедении.

Реализация приведенных направлений была бы невозможной без создания принципиально новых методов и аппаратуры для исследования и характеристики разрабатываемых материалов и процессов их формирования. Были разработаны методы химического, рентгеноструктурного, рентгеноспектрального и ядерно-физического анализа, электронной просвечивающей, сканирующей и туннельной микроскопии, методы определения электро- и теплофизических, механических и трибологических свойств материалов.

Перечисленные направления и достижения в области материаловедения сформировались в XX в. благодаря интернациональному содружеству замечательных ученых, многие из которых были отмечены Нобелевской премией и другими высокими наградами.

Существенный вклад в развитие науки о металлических материалах внесли Н. С. Курнаков, А. А. Байков, А. М. Бочвар, С. Т. Кишкин, С. С. Штейнберг, Г. П. Курдюмов, А. П. Гуляев и их последователи. Среди известных зарубежных ученых, без трудов которых немыслимы успехи развития материаловедения, следует назвать Ф. Осмонда, Г. Таммана, Э. Бейна, М. Мейла, Г. Розебума и др.

Анализ развития металлургии выплавки стали свидетельствует о том, что, если мировое производство стали в 1900 г. составляло 40 млн т в год, то к 2019 г. оно достигло 1 млрд 680 млн т в год, а доля производства остальных металлов, вместе взятых, составляет лишь 180 млн т в год, неметаллических материалов — примерно 200 млн т в год. Поэтому, если строго следовать естественно-исторической классификации, мы живем в «железном» веке, которому более

5 тыс. лет, и ничто не свидетельствует о том, что в обозримом будущем появится конкурент железу и его сплавам в качестве основного материала современной цивилизации. Металлургия черных металлов, несомненно, будет выполнять роль базовой отрасли материальной культуры планеты и в XXI в., но ее формы претерпят существенные изменения.

Важнейшими конструкционными материалами являются наноматериалы на основе сплавов титана, циркония, бериллия, ниобия, вольфрама, лития, аморфные, керамические и композиционные материалы, сплавы с эффектом памяти формы, редкоземельные материалы и др.

В настоящее время возродился интерес к изучению поведения металлов под влиянием энергии взрыва, примененного в начале 60-х гг. XX в. при сварке взрывом, которая уже используется в промышленности. Это позволило обнаружить, что высокие плотности энергии определяют поведение металлов и сплавов в обширной области фазовой диаграммы, занимая область от твердого тела и жидкости до нейтрального газа, покрывая фазовые границы плавления и кипения, а также область перехода металл — диэлектрик. Проблема перехода металл — диэлектрик в настоящее время получила значительное развитие по ударно-волновому сжатию диэлектриков.

Фундаментальные работы в области физики экстремальных состояний дадут новый импульс и в создании новых материалов, что убедительно подтверждено при проведении опытов с использованием ядерных взрывов с целью изменения свойств в экстремальных условиях, т. е. при давлениях до сотен миллионов атмосфер. Создание и получение новых материалов с новыми свойствами приведет к созданию и принципиально новых конструкций.

В XXI в. материаловедение становится одной из главенствующих фундаментальных и прикладных наук, на которые опирается технический прогресс и дальнейшее развитие общества, где средства коммуникации, накопления и передачи информации и связанные с ними проблемы создания новой техники приобретают особое значение.

# ВВЕДЕНИЕ

*Материаловедение* — это дисциплина, которая изучает способы получения материалов, их свойства и различные способы обработки, применяемые для производства деталей машин и различных сооружений. Известно, что машины, механизмы, станки, тракторы, танки, самолеты, корабли, орудия сделаны из различных материалов. Основным конструкционным материалом в машиностроении, судостроении и многих отраслях техники является металл. Основой материаловедения является металловедение.

*Металловедение* — наука, изучающая строение и свойства металлов и устанавливающая связь между их составом, строением и свойствами. Металловедение позволяет выбирать технически целесообразные и экономически выгодные металлы и сплавы для конкретных условий эксплуатации, разрабатывать новые сплавы, изменять в требуемых направлениях свойства уже используемых металлов и сплавов, применять наиболее рациональные режимы и методы термической обработки. В этом ряду с теоретической заключается и практическая ценность металловедения.

При выборе материала для интеллектуальных конструкций исходят из комплекса свойств, которые подразделяют на механические, физико-химические, технологические и эксплуатационные.

К **физическим** свойствам материалов относятся температура плавления, плотность, температурные коэффициенты линейного и объемного расширения, электросопротивление и электропроводимость, а также свойства, проявляющиеся при взаимодействии материала с физическими полями (гравитационным, температурным, электрическим, магнитным и т. д.). Физические свойства материалов обусловлены их составом и структурой.

К **химическим** свойствам материалов относятся их способность к химическому взаимодействию с агрессивными средами, а также антикоррозионные свойства.

Способность материала подвергаться различным методам горячей и холодной обработки определяют по его **технологическим** свойствам. К технологическим свойствам металлов и сплавов относятся литейные свойства, деформируемость, свариваемость и обрабатываемость режущим инструментом. Эти свойства позволяют производить формоизменяющую обработку и получать заготовки и детали конструкций.

*Литейные свойства* определяются способностью расплавленного металла или сплава к заполнению литейной формы, степенью химической неоднородности по сечению полученной отливки, а также величиной усадки — сокращением размеров при кристаллизации и дальнейшем охлаждении.

*Деформируемость* — это способность принимать необходимую форму под влиянием внешней нагрузки без разрушения и при наименьшем сопротивлении нагрузке.

*Свариваемость* — это способность металлов и сплавов образовывать неразъемные соединения требуемого качества.

*Обрабатываемостью* называют свойства металла поддаваться обработке резанием. Критериями обрабатываемости являются режимы резания и качество поверхностного слоя.

Технологические свойства определяют выбор материала для конструкции. Разрабатываемые материалы могут быть внедрены в производство только в том случае, если их технологические свойства удовлетворяют необходимым требованиям.

Современное автоматизированное производство интеллектуальных конструкций, оснащенное гибкими системами управления, нередко предъявляет к технологическим свойствам материала особые требования, которые должны позволять осуществлять комплексный технологический процесс на всех стадиях получения изделия с заданным ритмом, например проведение сварки на больших скоростях, ускоренный темп охлаждения отливок, обработка резанием на обрабатывающих центрах и при обеспечении необходимого условия — высокого качества получаемой продукции.

К эксплуатационным свойствам в зависимости от условия работы конструкции относят износостойкость, коррозионную стойкость, хладостойкость, жаропрочность, жаростойкость, антифрикционность материала и др.

*Износостойкость* — способность материала сопротивляться поверхностному разрушению под действием внешнего трения.

*Коррозионная стойкость* — сопротивление действию агрессивных кислотных и щелочных сред.

*Хладостойкость* — способность сохранять пластические свойства при температурах ниже 0°C.

*Жаропрочность* — способность сохранять механические свойства при высоких температурах.

*Жаростойкость* — способность сопротивляться окислению в газовой среде при высоких температурах.

*Антифрикционность* — способность прирабатываться к другому материалу.

Эти свойства определяются в зависимости от условия работы машин или конструкций специальными испытаниями.

При выборе материала для создания интеллектуальной технологичной конструкции необходимо комплексно учитывать его прочностные, технологические и эксплуатационные характеристики.

Прогресс в области создания новой интеллектуальной техники связан с работой по ряду взаимосвязанных направлений: совершенствование и создание конструкций машин, аппаратов и других изделий; разработка и применение новых материалов для деталей машин и приборов, обрабатывающего инструмента; разработка и широкое применение новых технологических процессов.

Различные условия работы той или иной детали интеллектуальных конструкций в целом требуют применения материала с вполне определенными свойствами, которые обеспечивают надежность работы при заданных условиях эксплуатации.

Особенно это относится к редкоземельным металлам (РЗМ), материалам ядерной энергетики, где применяются металлы и сплавы с особыми свойствами. Мировое производство РЗМ составляет примерно 130 тыс. т в год. Россия производит примерно 2% от мирового уровня.

Потребность в РЗМ для ядерной энергетики, а также интеллектуальной техники требует увеличения их производства в России. В 2016 г. в России введен в строй завод в г. Великий Новгород, который работает на сырье из Апатитов (Кольский полуостров).

В учебнике в основном рассматриваются РЗМ, необходимые для создания современных конструкций с интеллектуальным потенциалом и ядерной энергетики, повышающие эффективность и надежность при эксплуатации.

Гадолиний в ядерной энергетике используется при изготовлении регулирующих стержней ядерных реакторов и защитных керамических покрытий, в основном в виде окислов сульфидов, силицидов. Изотопы гадолиния с высоким сечением захвата нейтронов применяются в качестве выгорающих поглотителей нейтронов при малых потоках частиц и т. д.

Известно, что радиоактивность чистого тория выше активности урана. Это и является основной причиной повышенного интереса к этому элементу. Запасы тория в 3–4 раза превышают запасы урана в земной коре. Главными минералами тория являются монацитовый песок и ферриторит. Месторождения этих минералов расположены в Австралии, Индии, Норвегии, США, Канаде, Южной Америке и других странах.

В настоящее время рассматриваются проекты строительства ториевых энергетических реакторов в Китае и Индии.

Европий, как самый легкий элемент из лантаноидов, нашел применение в ядерной энергетике в системах защиты от излучений в качестве одного из эффективных поглотителей тепловых нейтронов.

По величине сечения захвата тепловых нейтронов изотоп бора занимает одно из первых мест среди всех элементов и изотопов, а тяжелый бор — одно из самых последних. Это значит, что материалы на основе обоих изотопов весьма интересны для реакторостроения и для других областей интеллектуальной техники.

Известно более 20 радиоактивных изотопов свинца. Разные изотопы свинца являются конечными продуктами распада урана и тория. Это способствует медленному увеличению свинца в земной коре в течение миллиардов лет. Исследуется возможность использования свинца в качестве теплоносителя быстрых реакторов (БР) и ускорительно управляемых систем радиогенного свинца, который может быть извлечен из торийсодержащих руд.

Значительный интерес для ядерной энергетики представляют эрбий, литий, скандий, цезий и многие другие материалы.

Важное значение для дальнейшего технического прогресса имеют разработка и применение новых технологических процессов. Все шире внедряются новые методы сварки (плазменная, электронно-лучевая, лазерная и др.), новые методы получения точных отливок, прогрессивные методы штамповки и прокатки, механизация и автоматизация технологических процессов. Поистине ре-



волюционные возможности открывают создание и внедрение миниатюрных управляющих машин, промышленных роботов на основе использования наноматериалов. Непрерывно увеличивается выпуск обрабатывающих центров металлорежущих станков с ЧПУ. Успешно внедряются аддитивные технологии изготовления различных деталей и конструкций.

Стоит задача: используя научные достижения, создать такие новые перспективные материалы, которые обеспечат нормальные и экстремальные условия работы принципиально новых интеллектуальных конструкций.

Материаловедение является одной из базовых дисциплин для изучения сопротивления материалов, теории механизмов и машин, деталей машин, устройства техники, паросиловых и дизельных энергетических установок, паровых и газовых турбин, двигателей внутреннего сгорания, интеллектуальных конструкций и систем.

Учебник базируется на многолетнем опыте преподавания дисциплины. В нем сохраняются основополагающие положения ранее изданных учебников.

Учебник предназначен для обучения, воспитания, развития познавательной активности мыслительной деятельности специалистов; удовлетворяет требованиям педагогики и психологии высшей школы; обеспечивает интерес, конкретность, доступность и доказательность излагаемого материала.

Авторы выражают признательность научной общественности за активную помощь в подготовке и оформлении учебника.

# Глава 1

## СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

### 1.1. Строение металлов, типы кристаллических решеток, анизотропия кристаллов

*Металлами* называются химические элементы, характерными признаками которых являются высокая тепло- и электропроводность; способность отражать электромагнитные волны (в связи с этим проявляется блеск и непрозрачность); повышенная способность к пластическому деформированию, т. е. способность изменять свою форму без нарушения сплошности; термоэлектронная эмиссия, т. е. способность испускать электроны при нагреве. Как отмечал М. В. Ломоносов, «металлы — светлые тела, которые ковать можно». Все металлы и металлические сплавы в твердом состоянии являются кристаллическими телами, в которых атомы занимают строго определенные пространственные положения.

Порядок расположения атомов характеризуется кристаллической решеткой, т. е. в кристаллических телах атомы расположены в определенной закономерности, образуя правильные геометрические фигуры. Если изобразить атомы в виде шариков и соединить их линиями, получится решетка, которая дает представление о расположении атомов в кристалле металла. В кристаллической решетке можно выделить геометрически правильный мельчайший объем, называемый *элементарной кристаллической ячейкой*. Примером элементарной кристаллической ячейки металла является объемно-центрированный куб (ОЦК), который состоит из 8 атомов в вершинах и одного атома в центре (рис. 1.1а). Элементарная ячейка, называемая *гранецентрированным кубом* (ГЦК), состоит из 14 атомов, из которых 8 атомов находятся в вершинах куба, а 6 расположены в центрах граней (рис. 1.1б). Гексагональную ячейку (ГП) составляют 17 атомов: 12 атомов по углам, 2 — в основаниях и 3 атома — внутри средней плоскости призмы (рис. 1.1в).

Для характеристики кристаллических решеток введены понятия координационного числа и коэффициента компактности.

Координационным числом  $\pi_k$  называется число атомов, находящихся на наиболее близком равном расстоянии от данного атома. Для ОЦК решетки координационное число равно 8, для решеток ГЦК и ГП оно составляет 12. Из этого следует, что решетка ОЦК менее компактна, чем решетки ГЦК и ГП.

Плотность кристаллической решетки, т. е. объем, занятый атомами, характеризуется *коэффициентом компактности*  $Q$ , который равен отношению суммарного объема атомов, входящих в решетку, к объему решетки:

$$Q = 4\pi_k R^3 n / 3V \cdot 100,$$

где  $R$  — радиус атома (иона);  $n$  — базис, или число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку;  $V$  — объем элементарной ячейки.

Для простой кубической решетки  $n = (1/8) \cdot 8 = 1$ ,  $V = a^3 = (2R)^3$  и коэффициент компактности  $Q = 52\%$ , для решетки ОЦК — 68%, ГЦК и ГП — 74%.

С увеличением компактности кристаллической решетки повышаются механические свойства металла.

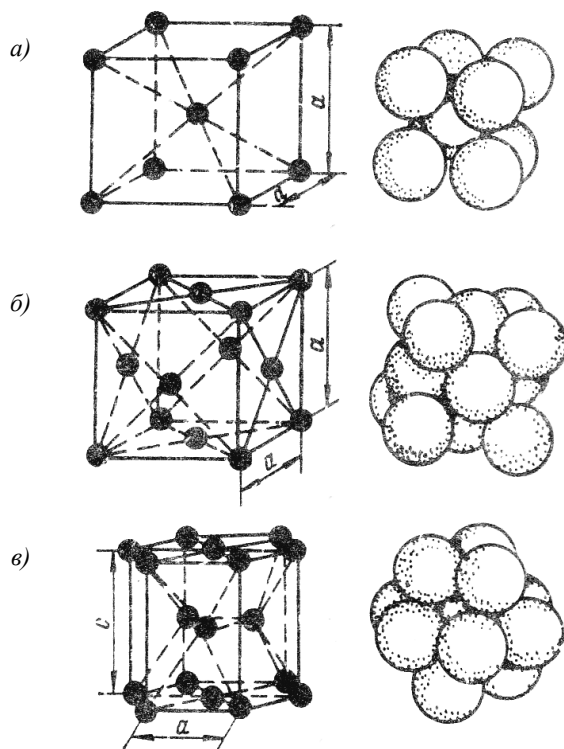


Рис. 1.1

*Кристаллические решетки и схемы упаковки атомов:*

*а — объемно-центрированная кубическая (ОЦК); б — гранецентрированная кубическая (ГЦК); в — гексагональная плотно упакованная (ГПУ).*

Свойства кристаллов определяются взаимодействием атомов и их взаимным расположением. В кристалле число атомов и расстояние между ними в различных кристаллографических направлениях различны, а поэтому различны и свойства. Например, прочность образцов, взятых в продольном и поперечном направлениях из одного и того же отдельно взятого кристалла (монокристалла) меди, различается в 2–2,5 раза. Такое различие свойств в разных направлениях кристаллической решетки называется *анизотропией*. Явление анизотропии в аморфных телах не наблюдается.

В отличие от металлов у аморфных веществ атомы расположены хаотически. К аморфным веществам относятся стекло, смола, пластмассы и др. При нагревании аморфные вещества переходят в жидкое состояние, постепенно размягчаясь, т. е. не имеют определенной точки плавления; механические свойства аморфных тел во всех направлениях одинаковы.

Свойства металлов зависят также от пространственного расположения элементарных частиц; химического состава, размера и формы кристаллов. Строение кристаллов описывает понятие «структура».

В зависимости от размеров структурных составляющих и применяемых методов их выявления используют следующие понятия: макро- и микроструктура, тонкая или межатомная структура. *Макроструктура* — порядок расположения кристаллов (зерен), выделяемых невооруженным глазом; *микроструктура* — порядок расположения мелких зерен, выделяемых под микроскопом; *тонкая* или *межатомная структура* изучается дифракционными методами (рентгенографией, электронографией, нейтронографией) и показывает расположение атомов в кристаллической решетке.

## 1.2. Формирование структуры металлов и сплавов при кристаллизации, полиморфизм металлов

Металлы могут находиться в газообразном, жидком и твердом состояниях. Переход из жидкого состояния в твердое называется *первичной кристаллизацией*. Процесс кристаллизации металлов впервые был изучен Д. К. Черновым.

Температурные условия процесса кристаллизации металлов устанавливают методом термического анализа. Записывая показания термометра, т. е. фиксируя температуру остывающего жидкого металла непрерывно или через определенные промежутки времени, получают кривые охлаждения (рис. 1.2). На кривой изменения температуры можно видеть, что в определенной ее точке понижение температуры металла прекращается. Это указывает на то, что при данной температуре в металле происходит изменение его состояния и структуры.

Температура, соответствующая какому-либо изменению состояния или внутреннего строения металла, называется *критической точкой*. Горизонтальный участок кривой соответствует температуре кристаллизации (затвердевания) чистого металла, а его протяженность указывает на продолжительность процесса затвердевания.

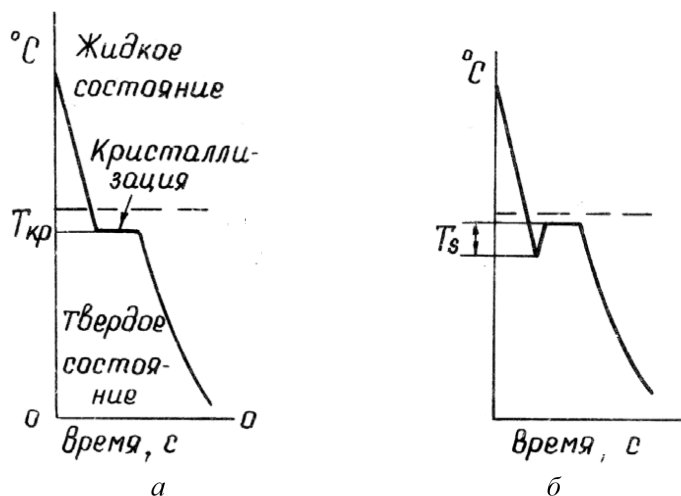


Рис. 1.2

Кривые охлаждения:

а — без петли переохлаждения; б — с петлей переохлаждения.

Некоторые металлы (Fe, Ti, Zn, Co, Sn) в твердом состоянии обладают способностью в процессе охлаждения или нагрева изменять строение кристаллической решетки. Эта способность металлов носит название полиморфизма или аллотропии (*греч.* — иной вид). Изменения, происходящие в расположении атомов в кристаллах, называются *полиморфным* или *аллотропическим превращением*.

Процесс перестройки кристаллической решетки из кристаллов прежней формации и образование новых кристаллов называется *вторичной кристаллизацией* или *перекристаллизацией*.

Д. К. Чернов впервые указал на то, что процесс кристаллизации жидкого металла состоит из двух одновременно идущих процессов — зарождения и роста кристаллов. Кристаллы могут зарождаться самопроизвольно (самопроизвольная кристаллизация) или расти на имеющихся готовых центрах кристаллизации (вынужденная кристаллизация). Установлена зависимость между числом центров кристаллизации (ЧЦ), скоростью роста кристаллов (СР) и величиной переохлаждения (рис. 1.3).

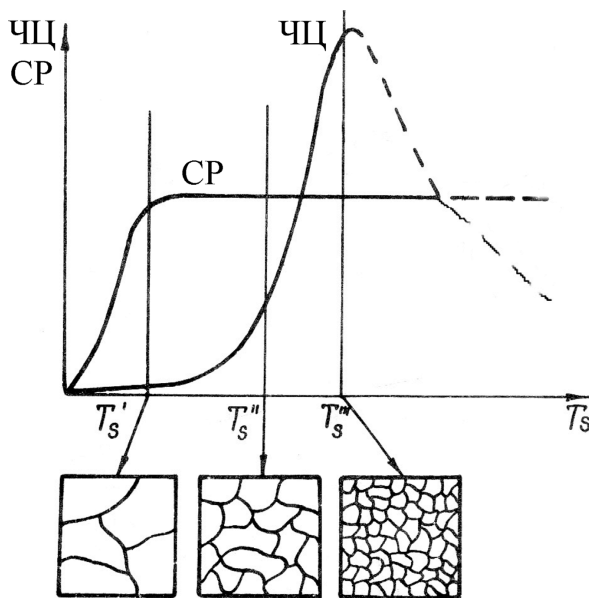


Рис. 1.3

Зависимость скорости самопроизвольного образования центров кристаллизации (ЧЦ) и линейной скорости роста кристаллов (СР) от степени переохлаждения

При температуре кристаллизации  $T_{кр}$ , когда переохлаждение отсутствует, число образовавшихся центров кристаллизации и скорость роста кристаллов весьма малы (практически равны нулю). Размеры образующихся кристаллов зависят от числа возникающих центров кристаллизации и скорости их роста. При увеличении степени переохлаждения  $T_s$  ЧЦ и СР увеличиваются; при каком-либо значении степени переохлаждения они достигают максимального значения и понижаются снова до нуля, и металл переходит в стеклообразное состоя-

ние, превращается в атмосферное тело и уменьшается диффузионная активность атомов при большом переохлаждении.

На реальный процесс кристаллизации металла и размеры полученных кристаллов (зерен) или кристаллитов существенное влияние оказывает наличие в жидком металле посторонних частиц (неметаллических включений — оксидов, нитридов, сульфидов и др.), состояние стенок изложницы или литейной формы, температура жидкого металла в момент разливки, вибрационные или ультразвуковые колебания, диффузионные процессы и другие факторы. Регулируя указанные факторы, можно изменять величину получаемых кристаллов и, следовательно, механические свойства. При измельчении зерна механические свойства металла улучшаются.

Существенное влияние на ЧЦ и СР при кристаллизации оказывает модифицирование, т. е. введение добавочных центров кристаллизации. Микрочастицы-модификаторы являются дополнительными центрами кристаллизации, что ведет к росту числа зерен, уменьшению их размеров, увеличению запаса поверхностной энергии, изменению свойств.

В процессе кристаллизации каждый кристаллик растет, особенно по граням наибольшей плотности. Поэтому развиваются древовидные кристаллы — дендриты — с главной и побочными осями роста. Для металлов, кристаллизующихся в реальных условиях, характерна так называемая дендритная структура, впервые полученная и описанная Д. К. Черновым.

Установлено, что из разных центров кристаллы растут неодинаково быстро и достигают различных размеров, причем по мере роста они постоянно по все большему числу точек соприкасаются друг с другом, что ведет к деформированию и получению неправильных границ и формы. Кристаллики с неправильными гранями называются *зернами* или *кристаллитами*.

### 1.2.1. Дефекты кристаллического строения

Различают теоретическую и практическую прочность металлов. Под *теоретической прочностью* понимают сопротивление деформации к разрушению, т. е. прочность, которую имел бы материал согласно физическим расчетам сил сцепления твердых тел. Чтобы разрушить кристалл, необходимо оторвать атомы друг от друга, преодолевая силы межатомного сцепления. С учетом этих сил прочность металлов пропорциональна  $1/6$  модуля сдвига или  $1/10$  модуля Юнга. Для железа теоретическая прочность должна быть равна 13 000 МПа, реальная же прочность чистого железа составляет всего лишь 150 МПа, т. е. в 100 раз меньше. Резкое снижение прочности чистого железа, а также и других металлов можно объяснить наличием в кристаллической решетке металлов различных дефектов кристаллического строения — точечных, линейных, поверхностных, объемных.

**Точечные дефекты** представляют собой нарушения периодичности кристаллической решетки; к ним относятся вакансии (узлы кристаллической решетки, свободные от атомов), межузельные атомы (находящиеся вне узла кристаллической решетки), а также привнесенные (замещающие атомы основного металла или внедряющиеся в межузельные) атомы. Все эти дефекты

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)