

профТЕХ

О.С. Комаров Л.Ф. Керженцева
Г.Г. Макаева

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ



О.С. Комаров Л.Ф. Керженцева

Г.Г. Макаева

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Утверждено
Министерством образования
Республики Беларусь
в качестве учебника для учащихся
учреждений, обеспечивающих
получение профессионально-технического
образования по машиностроительным
учебным специальностям

Под общей редакцией
доктора технических наук
О.С. Комарова



МИНСК
“ВЫШЭЙШАЯ ШКОЛА”
2009

УДК 621:620.22(075.32)

ББК 34.43я722

К63

Рецензенты: методическая комиссия профессионально-технического цикла Минского государственного профессионального лицея № 3 машиностроения (*О.В. Пасютина*); проректор по научной работе Белорусско-Российского университета доктор технических наук, профессор *Ф.Г. Ловшенко*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.

Комаров, О.С.

К63

Материаловедение в машиностроении: учебник / О. С. Комаров, Л. Ф. Керженцева, Г. Г. Макаева; под общ. ред. О. С. Комарова. Минск : Выш. шк., 2009. — 304 с. : ил. ISBN 978-985-06-1608-1.

Рассмотрены основы атомно-кристаллического строения металлов, процессы структурообразования, дефекты кристаллического строения, фазовые превращения и диаграммы состояния двойных сплавов. Описаны режимы термической и упрочняющей обработки, все классы сталей, их свойства и методы совершенствования, сплавы на основе цветных металлов, а также перспективные материалы — неметаллические, порошковые и композиционные. Изложены современные методы испытаний и критерии оценки конструктивной прочности материалов, определяющие их надежность и долговечность.

Для учащихся машиностроительных специальностей профессионально-технических учебных заведений. Будет полезен мастерам производственного обучения и молодым рабочим.

УДК 621:620.22(075.32)

ББК 34.43я722

ISBN 978-985-6-1608-1

© Комаров О.С., Керженцева Л.Ф., Макаева Г.Г., 2009

© Издательство «Высэйшая школа», 2009

ПРЕДИСЛОВИЕ

Материаловедение — это наука о материалах, применяемых в современном машиностроении. Круг их весьма широк. Наряду с традиционно используемыми сплавами на основе черных и цветных металлов широкое применение находят полимеры и композиционные материалы, а в последнее время — и материалы, полученные с применением нанотехнологий, а также металлы, которые за счет сверхбыстрого охлаждения имеют не кристаллическую, а аморфную структуру и вследствие этого обладают необычными свойствами.

Курс «Материаловедение» не только дает представление о свойствах металлов, но и показывает, как эти свойства зависят от структуры, какие существуют методы управления структурой и свойствами. Упор при этом делается на управление процессами кристаллизации и изменения структуры путем термической обработки различных видов.

Основное внимание уделяется наиболее широко используемым в современном машиностроении сплавам на основе железа. На железоуглеродистых сплавах (сталях и чугунах) изучаются общие закономерности первичной кристаллизации и превращений структуры в твердом состоянии, которые затем используются при изучении сплавов на основе цветных металлов.

Неметаллические материалы и металлы со специальными свойствами рассмотрены менее подробно. Это связано, во-первых, с их меньшим распространением, а во-вторых, со сложностью строения и структуры, изучение которых требует глубоких знаний из курсов органической химии и физики.

Учебник включает восемь глав. В первой главе приведены сведения о строении материалов, их свойствах и методах испытаний. Вторая посвящена теории сплавов и изучению диаграмм состояния, основной из которых является диаграмма Fe — C. В третьей и четвертой главах рассмотрены железоуглеродистые сплавы и их термическая и химико-термическая обработка, а в пятой — цветные металлы и сплавы на основе меди, алюминия, магния, титана и бериллия. Шестая глава посвящена твердым сплавам, абразивным материалам и минералокерамике, в седьмой описаны неметаллические материалы, а в восьмой изложены общие представления о прогрессивных материалах со специальными свойствами, таких как композиционные, тугоплавкие, аморфные и наноматериалы.

Курс «Материаловедение» является связующим звеном между общеобразовательными дисциплинами (химия, физика) и специальными дисциплинами для термистов, слесарей-авторемонтников, литейщиков, сварщиков и т.д. Знания, полученные при изучении данного курса, позволят объяснить процессы, протекающие в материалах при их нагреве, деформации, механической обработке, и изменения, наблюдаемые в ходе эксплуатации изделий из этих материалов в различных средах и при различных нагрузках.

Учебник основывается на одобренной Министерством образования программе, общая концепция которой базируется на трех краеугольных принципах:

1) непрерывность образования, предполагающая наличие органической связи между профессиональным, средним и высшим техническим образованием;

2) универсальность учебника, рассчитанного на использование при подготовке специалистов различных профилей (исходя из этого, в каждой главе дается максимум информационного материала, часть которого может быть сокращена или опущена для конкретных специальностей);

3) органическая связь между отдельными разделами (исходя из этого, учащийся должен уметь с учетом условий работы детали обоснованно выбирать материал, способ его производства, а также подбирать режимы его термической обработки).

Материал учебника распределен между авторами следующим образом: гл. 1 и 5 написал О.С. Комаров, гл. 2—4 — Г.Г. Макаева, гл. 6—8 — Л.Ф. Керженцева.

Авторы выражают искреннюю признательность рецензентам — членам методической комиссии профессионально-технического цикла Минского государственного профессионального лицея № 3 машиностроения (особо преподавателю общетехнических дисциплин О.В. Пасютиной) и проректору по научной работе Белорусско-Российского университета доктору технических наук, профессору Ф.Г. Ловшенко, — замечания и рекомендации которых способствовали улучшению учебника.

Все отзывы и пожелания просьба направлять по адресу: издательство «Вышэйшая школа», пр. Победителей, 11, 220048, Минск.

Авторы

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ, СВОЙСТВАХ И МЕТОДАХ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

1.1. Классификация металлических материалов

Существует несколько классификаций металлов. В данном учебнике за основу принята классификация, предложенная проф. А.П. Гуляевым, согласно которой все металлы делятся на *черные*, имеющие темно-серый цвет, и *цветные*, окраска которых может быть красной, желтой и белой.

Черные металлы подразделяются на следующие виды:

- *железные* — железо, кобальт, никель и марганец; три последних могут использоваться самостоятельно, но чаще добавляются к железу, образуя сплавы и меняя его свойства в желаемом направлении;

- *тугоплавкие* — металлы, температура плавления которых выше, чем у железа (1539 °С). К ним относятся титан, ванадий, хром, цирконий, молибден, вольфрам и другие металлы. Они используются как добавки к железу или в качестве основы для получения сплавов специального назначения;

- *урановые* — актиниды (уран, плутоний и др.), применяемые в атомной энергетике;

- *редкоземельные* — лантан, церий, неодим и другие металлы, объединяемые под общим названием лантаноидов. Их используют в качестве присадок для улучшения свойств других металлов;

- *щелочноземельные* — натрий, калий, цезий и другие металлы; в свободном металлическом состоянии в технике применяются крайне редко в связи с их химической активностью и низкими механическими свойствами.

Цветные металлы подразделяются на следующие виды:

- *легкие* — бериллий, магний, алюминий, нашедшие широкое применение в виде сплавов в авиации, космической и автомобильной технике;

- *благородные* — серебро, золото, платина и другие металлы, обладающие высокой устойчивостью к коррозии. К этой группе может быть отнесена и медь;

- *легкоплавкие* — цинк, ртуть, олово, свинец и другие металлы, отличающиеся низкой температурой плавления; используются в основном для получения сплавов на основе других металлов.

В земной коре содержится: O_2 — 47,0%; Si — 29,5; Al — 8,8; Fe — 4,65; Ca, Na, K, Mg — в сумме 9% и Ti — 0,45%. На долю всех остальных элементов приходится менее 1%.

В первом приближении металлические материалы, применяемые в технике, можно разделить на две группы: чистые металлы, используемые преимущественно в электротехнике, и сплавы нескольких металлов, которые применяются в различных областях машиностроения.

1.2. Кристаллическое строение металлов

В твердых телах между атомами вещества существуют силы взаимодействия, обеспечивающие связь между соседними атомами. Различают *ковалентную химическую связь*, возникающую в том случае, когда валентные электроны становятся общими для двух атомов, и *ионную*, или *гетерополярную*, характерную для молекул, образованных из разных ионов (аниона и катиона). Типичный представитель этой группы веществ — соль NaCl. В ней натрий отдает электрон хлору, который становится отрицательно заряженным, а сам натрий — положительно заряженным.

Для металлов характерна *металлическая связь*, которая возникает в результате взаимодействия положительных ионов, расположенных в пространстве в виде решетки и обобществленных электронов. Таким образом, в металле существует как бы «облако» из электронов, в результате чего эта связь допускает большее смещение атомов по сравнению с другими видами связи, что обуславливает высокую пластичность металлов. Наличие не связанных с атомами электронов объясняет высокую тепло- и электропроводность металлов.

Твердые тела могут быть *кристаллическими*, атомы в которых располагаются в пространстве закономерно в трех измерениях через строго определенные для каждого вещества расстояния, и *аморфными* с хаотическим расположением атомов. Всего существует семь типов кристаллических решеток, но для металлов характерна кубическая (объемно центрированная или гранецентрированная) и гексагональная (рис. 1.1).

Для характеристики величины атома служит *атомный радиус*, под которым понимают половину расстояния между ближайшими соседними атомами в решетке. Параметры элементарной решетки (a и c) и атомные радиусы измеряются в ангстремах ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$) или нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ см} = 10 \text{ \AA}$).

В *объемно центрированной кубической (ОЦК) решетке* атомы расположены в вершинах и в центре куба; такую решетку имеют Na, V, Fe_α, Cr, W и другие металлы. В *ранецентрированной кубической (ГЦК) решетке* атомы расположены в вершинах куба и в центре каждой грани; решетку такого типа имеют, например, Pb, Al, Ni, Ag, Cu, Co, Fe_γ. В *гексагональной плотноупакованной (ГП) решетке* атомы расположены в вершинах и центре шестиугольных оснований и три атома – в средней плоскости призмы (Mg, Ti, Zn, Ca, Be и т.д.).

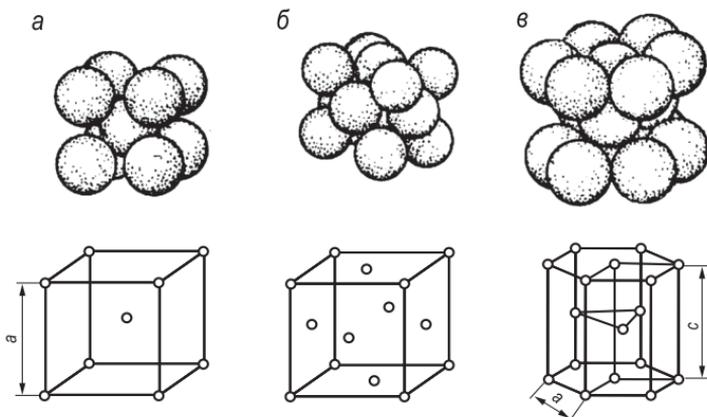


Рис. 1.1. Кристаллическое строение металлов:

a – объемно центрированная кубическая решетка; *б* – гранецентрированная; *в* – гексагональная плотноупакованная

Наиболее важной характеристикой решетки является ее *период*, под которым понимаются расстояние между двумя соседними параллельными кристаллографическими плоскостями в элементарной ячейке решетки. Для большинства металлов эта величина лежит в пределах 0,1...0,7 нм.

1.3. Кристаллизация металлов

Переход металла из жидкого состояния в твердое с образованием кристаллической структуры называется *первичной кристаллизацией*, а образование новых кристаллов в твердом кристаллическом веществе – *вторичной кристаллизацией*.

Кристаллизация обусловлена стремлением системы при определенных условиях перейти в энергетически более устой-

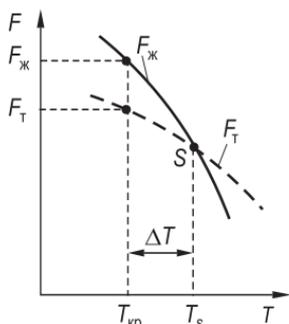


Рис. 1.2. Зависимость свободной энергии F от температуры металла в жидком ($F_{ж}$) и твердом ($F_{т}$) состоянии

чивое состояние с меньшей свободной энергией F . На рис. 1.2 показан характер изменения свободной энергии для жидкой и твердой фаз по мере изменения температуры системы. Выше определенной температуры, которая называется **теоретической температурой плавления** (точка T_s), меньшей свободной энергией обладает вещество в жидком состоянии, а ниже — в твердом. В реальных условиях процесс кристаллизации не может начаться при температуре T_s , так как при данной температуре система находится в состоянии равновесия ($F_{ж} = F_{т}$). Для того чтобы процесс кристаллизации начался, жидкость необходимо охладить до температуры ниже температуры в точке T_s . Температура, при которой реально начинается процесс кристаллизации, называется **фактической температурой кристаллизации** и обозначается $T_{кр}$. Разность между теоретической температурой T_s и реальной $T_{кр}$, при которой протекает кристаллизация, называется **степенью переохлаждения системы** и обозначается ΔT . При нагреве переход из твердого состояния в жидкое также начинается при определенной степени перегрева системы.

Кристаллизацию металлов и сплавов исследуют с помощью **термического анализа**, суть которого заключается в регистрации температуры системы через равные промежутки времени. Для этого в тигель 1 (рис. 1.3, а) с расплавленным металлом погружают термоэлектрический термометр 2 (термопару), подключенный к регистрирующему потенциометру 3. На основании полученных данных в координатах температура — время строят **кривую охлаждения** (рис. 1.3, б), которая отражает последовательность протекания процессов кристаллизации.

На рис. 1.4 приведены кривые охлаждения расплава при кристаллизации с различной скоростью охлаждения. Верхний участок кривой охлаждения показывает понижение температуры жидкого металла. При температурах, соответствующих горизонтальному участку, происходит процесс затвердевания жидкого металла. Выделение скрытой теплоты кристаллизации способствует сохранению постоянной температуры в течение

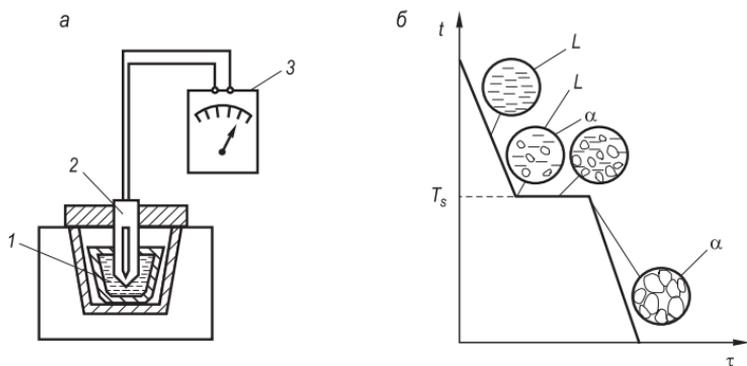


Рис. 1.3. Кристаллизация металлов:

a – схема установки для регистрации температуры; *б* – кривая охлаждения и схема процесса кристаллизации (*L* – жидкое состояние; α – твердый раствор)

ние времени, необходимого для завершения всего процесса. Нижний участок кривой соответствует охлаждению закристаллизовавшегося металла. Тонкой горизонтальной линией на диаграмме показано значение теоретической температуры кристаллизации T_s .

На рис. 1.4, *a* приведены кривые охлаждения металла при кристаллизации с различными скоростями охлаждения. Видно, что по мере увеличения скорости охлаждения степень переохлаждения расплава возрастает и кристаллизация начинается при более низких температурах. Продолжительность кристаллизации при этом сокращается.

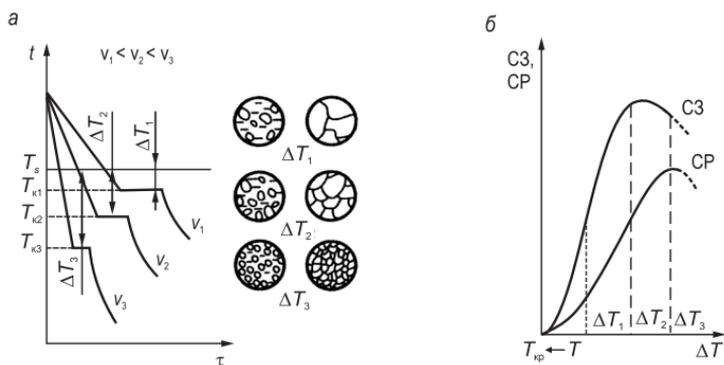


Рис. 1.4. Зависимость переохлаждения расплава ΔT от скорости охлаждения v (*a*) и скорости зарождения (C3) и роста (CP) кристаллов от величины переохлаждения расплава (*б*)

Основы теории кристаллизации разработаны более 100 лет назад основоположником науки о металлах — металлостроения — Д.К. Черновым, который установил, что кристаллизация состоит из двух процессов: зарождения мельчайших частиц твердого вещества, называемых *зародышами* или *центрами кристаллизации*, и роста кристаллов из этих центров (рис. 1.4, б).

При переохлаждении металла ниже температуры T_s в объеме жидкого металла образуются устойчивые, способные к росту кристаллические зародыши. С понижением температуры размер таких зародышей и их количество возрастают. В реальных условиях центры кристаллизации образуются на тугоплавких неметаллических включениях. Рост кристалла заключается в том, что к поверхности зародышей присоединяются все новые атомы из жидкого металла. Сначала образовавшиеся кристаллы растут свободно, сохраняя правильную геометрическую форму. При столкновении растущих кристаллов их форма нарушается, и в дальнейшем рост продолжается только там, где есть свободный доступ к расплаву. В результате кристаллы не имеют правильной геометрической формы и называются *зернами*. Размер зерен зависит от скорости зарождения центров кристаллизации и скорости роста кристаллов. На рис. 1.4, б показана зависимость этих параметров от степени переохлаждения расплава.

Существование кристаллических решеток разных типов у одного и того же вещества при различных температуре и давлении называется *полиморфизмом* или *аллотропией*, а процесс перехода из одной кристаллической формы в другую — *полиморфным* или *аллотропическим превращением*. Ряд элементов (Co, Ti, Mn, Sn, Ca, Li, Fe и др.) имеет два и более типов (модификаций) кристаллических решеток, которые обозначаются строчными буквами греческого алфавита (α , β , γ и т.д.) начиная с той формы, которая существует при более низкой температуре.

Процесс перехода из одной формы в другую определяется термодинамическим состоянием системы и объясняется тем, что начиная с определенной температуры (температуры перекристаллизации) новая модификация обладает меньшим запасом энергии и является энергетически более устойчивой. Температура, при которой осуществляется переход из одной модификации в другую, называется *температурой полиморфного превращения*.

Новые полиморфные формы образуются в результате зарождения центров и роста кристаллов аналогично кристаллизации из жидкого состояния. На рис. 1.5 приведены кривые охлаждения и нагрева железа, характеризующие полиморфные превращения. Железо имеет объемно центрированную кубическую решетку при температурах ниже 911 °С и выше 1392 °С и обозначается Fe_{α} . В интервале температур от 911 до 1392 °С оно имеет гранецентрированную кубическую решетку и обозначается Fe_{γ} .

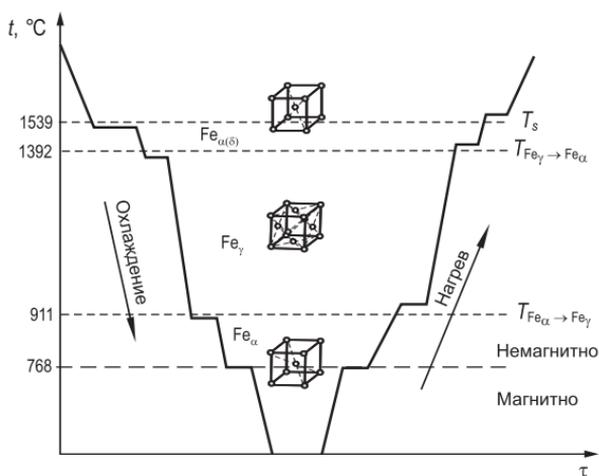


Рис. 1.5. Кривые охлаждения и нагрева железа

При температуре 768 °С (точка Кюри) происходит изменение магнитных свойств железа: ниже 768 °С оно магнитно, выше — немагнитно (немагнитное α -железо называют иногда β -железом).

1.4. Структура металла и контроль его качества

Как уже отмечалось, различают первичную структуру, образующуюся в процессе кристаллизации металла, и вторичную, отображающую изменения внутри кристаллов первичной структуры вследствие аллотропических превращений или в результате термической обработки. Первичную структуру принято изучать на примере кристаллизации слитков.

Структура литого слитка состоит из трех основных зон (рис. 1.6). Первая зона — наружная *мелкозернистая корка 1*, состоящая из дезориентированных мелких кристаллов — *ден-*

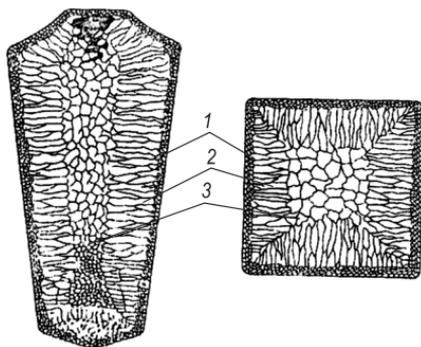


Рис. 1.6. Структура литого слитка

дритов. При первом соприкосновении со стенками изложницы в тонком прилегающем слое жидкого металла возникает резкий градиент температур и наблюдается явление переохлаждения, ведущее к образованию большого количества центров кристаллизации. В результате корка получает мелкозернистое строение.

Вторая зона слитка — *зона столбчатых кристаллов 2*. После образования корки условия теплоотвода меняются (из-за теплового сопротивления, повышения температуры стенки изложницы и других причин). Градиент температур в прилегающем слое жидкого металла резко уменьшается, а следовательно, уменьшается степень переохлаждения стали. В результате из небольшого количества центров кристаллизации начинают расти нормально ориентированные к поверхности корки (т.е. в направлении отвода теплоты) столбчатые кристаллы.

Третья зона слитка — *зона равноосных кристаллов 3*. В центре слитка уже нет определенной направленности отдачи теплоты. Д.К. Чернов отмечал, что температура застывающего металла успевает почти совершенно уравниваться в различных точках и жидкость обращается как бы в кашеобразное состояние вследствие образования в различных ее точках зачатков кристаллов. Далее зачатки разрастаются осями-ветвями по различным направлениям, встречаясь друг с другом. В результате этого процесса образуется равноосная структура. Зародышами кристалла здесь являются обычно присутствующие в жидкой стали различные мельчайшие включения или случайно в нее попавшие, или не растворившиеся в жидком металле. В зоне столбчатых кристаллов металл более плотный, он содержит меньше раковин и газовых пузырей. Однако места стыка столбчатых кристаллов обладают малой прочностью.

Кристаллизация, приводящая к росту зоны столбчатых кристаллов до центра слитка, называется *транскристаллизацией*.

Жидкий металл имеет больший объем, чем закристаллизовавшийся, поэтому объем металла, залитого в форму, в процессе кристаллизации уменьшается, что приводит к образованию пустот, называемых *усадочными раковинами*. Усадочные раковины могут быть сконцентрированы в одном месте или рассеяны по всему объему слитка либо по его части.

Форма первичных кристаллов (дендритов) после горячей механической обработки давлением (ковка, прессование, прокатка и т.д.) видоизменяется. Дендриты вытягиваются вдоль направления течения металла и превращаются в *волокна*. В результате возникает различие в свойствах вдоль проката (вдоль волокна) и поперек.

Первичная структура (макроструктура) исследуется на изломе литых заготовок и слитков или путем их продольного разрезания с последующим шлифованием, полированием и травлением в растворах кислот. Для изучения микроструктуры из заготовок вырезают пробы, поверхности которых полируют, травят и изучают при различных увеличениях под микроскопом.

В процессе кристаллизации слитков, их последующей пластической деформации и термической обработки в металле образуются различные дефекты (шлаковые включения, газовые раковины, трещины и др.). Для выявления этих дефектов, наличие которых в деталях не допускается по условиям эксплуатации, разработаны различные методы контроля качества металла и его структуры. Наибольший интерес представляют неразрушающие методы контроля, при использовании которых изделиям из металла не причиняются повреждения. К таким методам относятся *рентгеновское* и *гамма-просвечивание*, *магнитный*, *ультразвуковой* и др. Первые два относятся к методам радиационного контроля.

Рентгеновский аппарат (рис. 1.7, а) состоит из рентгеновского излучателя (РИ) и пульта управления (ПУ). Излучатель представляет собой металлический защитный корпус 2, в котором размещается рентгеновская трубка (РТ) и блок трансформаторов 1. Защитный кожух имеет окно для выхода рентгеновского излучения. Рентгеновская трубка является основным элементом аппарата и представляет собой вакуумируемую колбу 8 с запаянными в нее катодом 10 и анодом 3. Нить накала 9 катода изготавливается из вольфрама и разогревается электрическим током до температуры 2400...3000 °С, при которой происходит термоэмиссия электронов. Электроны разгоняются в электрическом поле, попадают на зеркало анода 7 и отдают

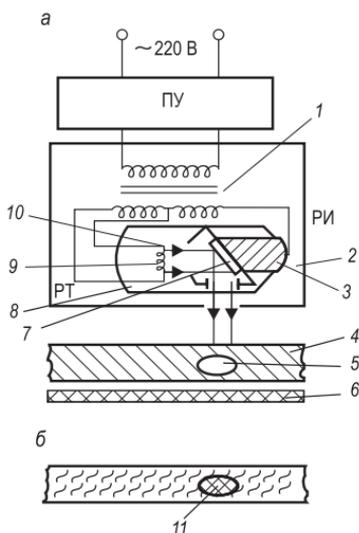


Рис. 1.7. Схема рентгеновского аппарата

ему свою кинетическую энергию, часть которой преобразуется в рентгеновское излучение.

Рентгеновские лучи проходят через просвечиваемое изделие 4 и попадают на фотопленку 6. Если в металле имеются дефекты, например газовые или шлаковые включения 5, проводимость рентгеновских лучей у которых выше, чем у металла, то на пленке в месте расположения включения проявится темное пятно 11. На рис. 17, б представлен вид сверху на фотопленку.

Сходные результаты получают в случае просвечивания γ -лучами (рис. 1.8). Ампула 1 с радиоактивным веществом установлена в свинцовом кожухе 2, через отверстие которого выходит поток γ -лучей. В случае наличия в изделии 3 дефекта на фотопленке 4 появится пятно, интенсивность потемнения которого выше, чем у окружающего фона.

Ультразвуковой метод контроля качества металла относится к эхоакустическим методам. Он основан на вводе ультразвуковых колебаний (УЗК) в исследуемый объект и регистрации отраженных волн (рис. 1.9).

Электрический сигнал от генератора импульсов 4 поступает на электроакустический преобразователь 3 и электронно-лучевую трубку (ЭЛТ) 5, на экране 6 которой формируется на-

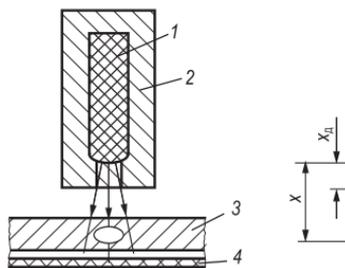


Рис. 1.8. Просвечивание γ -лучами

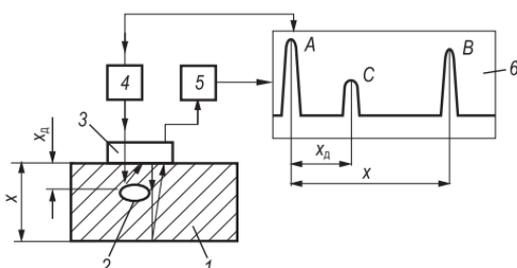


Рис. 1.9. Принципиальная схема ультразвукового метода контроля

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Основные сведения о строении, свойствах и методах испытания металлов и сплавов	5
1.1. Классификация металлических материалов	5
1.2. Кристаллическое строение металлов	6
1.3. Кристаллизация металлов	7
1.4. Структура металла и контроль его качества	11
1.5. Физические и химические свойства металлов	15
1.6. Общие сведения о деформации	21
1.7. Механические свойства металлов	25
1.7.1. Статические испытания на растяжение	25
1.7.2. Определение твердости металлов	33
1.7.3. Определение ударной вязкости	45
1.7.4. Испытания на усталость	49
1.7.5. Испытания на ползучесть	52
1.8. Технологические свойства металлов и сплавов	54
1.8.1. Обрабатываемость резанием	54
1.8.2. Свариваемость металлов и сплавов	55
1.8.3. Ковкость	56
1.8.4. Литейные свойства сплавов	58
1.9. Коррозия металлов	59
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	<i>60</i>
2. Основные сведения из теории сплавов. Диаграмма состояния железо-углеродистых сплавов	62
2.1. Основные сведения о металлических сплавах	62
2.2. Диаграммы состояния двойных сплавов	64
2.2.1. Построение диаграмм состояния	64
2.2.2. Диаграмма состояния для сплавов, компоненты которых не растворимы в твердом состоянии (I рода)	66
2.2.3. Диаграмма состояния для сплавов, компоненты которых неограниченно растворимы в твердом состоянии (II рода)	69
2.2.4. Диаграмма состояния для сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (III рода)	71
2.2.5. Диаграмма состояния для сплавов, компоненты которых образуют устойчивое химическое соединение (IV рода)	74
2.2.6. Связь между свойствами сплавов и типом диаграммы состояния	75
2.3. Диаграмма состояния Fe – Fe ₃ C	77
2.3.1. Железо и его сплавы	77
2.3.2. Участок диаграммы состояния Fe – Fe ₃ C с концентрацией углерода 0...2,14%	82
2.3.3. Участок диаграммы состояния Fe – Fe ₃ C с концентрацией углерода 2,14...6,67%	83
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	<i>89</i>

3. Термическая, химико-термическая и термомеханическая обработка металлических материалов	90
3.1. Теоретические основы термической обработки металлов	90
3.1.1. Виды термической обработки	90
3.1.2. Превращение перлита в аустенит и рост зерна аустенита при нагреве	92
3.1.3. Превращение аустенита при охлаждении	95
3.1.4. Мартенситное превращение	101
3.1.5. Превращения мартенсита при нагреве	103
3.2. Технологические возможности и особенности отжига, нормализации, закалки и отпуска	105
3.2.1. Технология термической обработки	105
3.2.2. Отжиг и нормализация. Назначение и режимы	106
3.2.3. Закалка сталей	111
3.2.4. Поверхностное упрочнение стальных деталей	118
3.2.5. Отпуск сталей	121
3.3. Термомеханическая обработка стали	123
3.4. Упрочнение методом пластической деформации	125
3.5. Термическая обработка чугуна	126
3.6. Дефекты термической обработки стали	127
3.7. Химико-термическая обработка стали	128
3.7.1. Основы химико-термической обработки стали	128
3.7.2. Назначение и технология химико-термической обработки	129
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	139
4. Железоуглеродистые сплавы	141
4.1. Краткие сведения о способах получения чугуна и стали	141
4.1.1. Производство чугуна	141
4.1.2. Производство стали	146
4.2. Чугуны	148
4.2.1. Классификация чугунов	148
4.2.2. Влияние графита на механические свойства отливок	151
4.2.3. Серый чугун	152
4.2.4. Ковкий чугун	154
4.2.5. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом	157
4.3. Стали	159
4.3.1. Основные определения	159
4.3.2. Влияние примесей	160
4.3.3. Классификация сталей	163
4.3.4. Маркировка сталей	165
4.4. Углеродистые стали	166
4.4.1. Углеродистые конструкционные стали	166
4.4.2. Углеродистые инструментальные стали	169
4.5. Легированные стали	170
4.5.1. Легированные конструкционные стали	170
4.5.2. Легированные инструментальные стали	177

4.5.3. Стали специального назначения	184
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	187
5. Цветные металлы и сплавы	189
5.1. Общее понятие о цветных металлах	189
5.2. Алюминий и его сплавы	189
5.3. Магний и его сплавы	196
5.4. Медь и ее сплавы	198
5.5. Титан и его сплавы	204
5.6. Бериллий и его сплавы	206
5.7. Антифрикционные и жаропрочные сплавы	210
5.7.1. Общая характеристика антифрикционных сплавов	210
5.7.2. Легкоплавкие подшипниковые сплавы	211
5.7.3. Жаропрочные сплавы на основе никеля и кобальта	214
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	216
6. Твердые сплавы, минералокерамика, абразивные материалы	218
6.1. Спеченные твердые сплавы	218
6.2. Литые и порошкообразные твердые сплавы	222
6.3. Минералокерамика	224
6.4. Абразивный инструмент	226
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	230
7. Неметаллические материалы	231
7.1. Классификация неметаллических материалов	231
7.2. Пластмассы	231
7.2.1. Общая характеристика полимеров	231
7.2.2. Общая характеристика пластмасс	233
7.2.3. Методы получения изделий из пластмасс	241
7.3. Резиновые материалы	246
7.3.1. Общая характеристика резиновых материалов	246
7.3.2. Классификация резин и их назначение	248
7.4. Лакокрасочные материалы	250
7.4.1. Назначение и состав лакокрасочных материалов	250
7.4.2. Виды лакокрасочных материалов	252
7.4.3. Основные характеристики лакокрасочных материалов	254
7.4.4. Технология нанесения лакокрасочных материалов	254
7.5. Склеивающие материалы	256
7.5.1. Общая характеристика склеивающих материалов	256
7.5.2. Классификация клеев	258
7.6. Смазочные материалы	260
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	264
8. Прогрессивные материалы	266
8.1. Композиционные материалы	266
8.1.1. Классификация и состав композиционных материалов	266

8.1.2. Свойства и области применения композиционных материалов	269
8.1.3. Технологические особенности получения композиционных материалов	273
8.2. Тугоплавкие металлы и их сплавы	277
8.3. Аморфные материалы	280
8.3.1. Общая характеристика аморфных материалов	280
8.3.2. Свойства и области применения аморфных материалов ..	282
8.3.3. Методы получения аморфных материалов	284
8.4. Сплавы с эффектом памяти формы	287
8.5. Техническая керамика	289
8.5.1. Общая характеристика технической керамики	289
8.5.2. Технические керамические материалы и области их применения	291
8.5.3. Технология получения керамики	295
8.6. Сверхтвердые инструментальные материалы	296
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	299
Литература	300

Учебное издание

Комаров Олег Сидорович
Керженева Людмила Федоровна
Макаева Галина Григорьевна

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Учебник

Редактор *Е.В. Малышева*
Художественный редактор *Е.Э. Агунович*
Технический редактор *Н.А. Лебедевич*
Корректор *Т.К. Хваль*
Компьютерная верстка *И.В. Скубий*

Подписано в печать 23.03.2009. Формат 84×108/32. Бумага офсетная. Офсетная печать. Гарнитура «Нимбус». Усл. печ. л. 15,96. Уч.-изд. л. 16,41. Тираж 2000 экз. Заказ 671.

Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Вышэйшая школа”». ЛИ № 02330/0494062 от 03.02.2009. Пр. Победителей, 11, 220048, Минск. <http://vshph.com>

Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Белорусский Дом печати”». ЛП № 02330/0131528 от 30.04.2004. Пр. Независимости, 79, 220013, Минск.