

Г. М. ВОЛКОВ, В. М. ЗУЕВ

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**УЧЕБНИК**

*Рекомендовано*

*Научно-методическим советом по материаловедению и технологии  
конструкционных материалов в качестве учебника  
для студентов высших технических учебных заведений,  
обучающихся по немашиностроительным направлениям*

2-е издание, переработанное



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2012

УДК 620.22(075.8)  
ББК 30.3я73  
В676

Рецензенты:

профессор кафедры «Технология конструкционных материалов»  
Московского автомобильно-дорожного института (Государственный  
технический университет), д-р техн. наук *В. Д. Александров*;  
главный научный сотрудник ОАО «НИИТавтопром», д-р техн. наук,  
проф. *В. М. Зинченко*

**Волков Г. М.**

**В676** Материаловедение : учебник для студ. учреждений высш.  
проф. образования / Г. М. Волков, В. М. Зуев. — 2-е изд., пере-  
раб. — М. : Издательский центр «Академия», 2012. — 448 с. —  
(Сер. Бакалавриат).

ISBN 978-5-7695-8087-1

Учебник создан в соответствии с Федеральным государственным образо-  
вательным стандартом по немашиностроительным направлениям подготовки  
(квалификация «бакалавр»).

Изложены критерии оценки и особенности формирования потребитель-  
ских свойств современных материалов технического назначения, представле-  
на их классификация. Рассмотрены основные свойства и обусловленные ими  
области рационального применения металлических, неметаллических и ком-  
позиционных материалов. Показаны перспективы использования наномате-  
риалов в различных отраслях промышленного производства. Приведены кон-  
трольные задания по основным разделам курса.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.  
Может быть полезен специалистам разных отраслей промышленного произ-  
водства.

УДК 620.22(075.8)  
ББК 30.3я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом  
без согласия правообладателя запрещается*

ISBN 978-5-7695-8087-1

© Волков Г. М., Зуев В. М., 2012  
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2012  
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2012

Ранее предмет «материаловедение» назывался «металловедение». Однако расширение технического применения полимеров и других неметаллических материалов привело к соответствующему изменению содержания и самого названия учебной дисциплины — она стала называться «материаловедение».

До недавнего времени учебники по этому предмету были ориентированы преимущественно на будущих материаловедов и машиностроителей. Но сегодня общепризнана необходимость изучения материаловедения всеми студентами высших технических учебных заведений, включая получающих квалификацию «бакалавр» по тем направлениям, для которых материаловедение не является профилирующей дисциплиной.

Как показывает многолетняя практика, студенты, получающие квалификацию «бакалавр», не имеют специальной подготовки в области металло- и материаловедения или технологии машиностроения. Поэтому сложно осваивать этот предмет по учебникам, рассчитанным на предварительное углубленное изучение сопутствующих учебных дисциплин. В особой степени это относится к студентам заочной формы обучения.

Между тем, развитие техники предъявляет новые повышенные требования к материалам, поэтому материаловедение использует все более сложные для восприятия неподготовленным студентом достижения фундаментальных наук. С другой стороны, развитие материаловедения оказывает влияние практически на все сферы производственной деятельности. Это неизбежно затрудняет формирование сжатого общего курса материаловедения для подготовки бакалавров технического профиля. Авторы, понимая сложность такой задачи и учитывая все многообразие используемых в технике материалов, попытались в общем виде отразить главные особенности состава, структуры и свойств важнейших технических материалов, показать основные проблемы их практического применения и пути реализации потенциальных возможностей перспективных материалов.

В соответствии с поставленной задачей в настоящем учебнике рассмотрены металлические и неметаллические материалы техниче-

ского назначения: черные и цветные металлы (с описанием технологии их упрочнения); неметаллические, композиционные и нанокристаллические материалы. Авторы стремились изложить предмет таким образом, чтобы он мог быть успешно освоен получающими квалификацию «бакалавр» со знанием базовых курсов «физика» и «химия» на уровне программ средней школы.

Для лучшего усвоения и закрепления основных теоретических положений материаловедения отдано предпочтение качественному, а не количественному изложению теоретических закономерностей. Цифровые значения некоторых параметров округлены. Кроме того, оптимизирован объем лабораторных работ, а их построение предусматривает возможность самостоятельного их выполнения.

Учебник предназначен для студентов, получающих квалификацию «бакалавр» по немашиностроительным направлениям подготовки в технических вузах очной, очно-заочной и заочной формах обучения. Основой учебника является материал, используемый авторами в течение ряда лет для проведения занятий в МГТУ «МАМИ» (Московский государственный технический университет «Московский автомобильный институт»).

Автор разд. I, III—V, заданий к лабораторной работе № 5 и практическому занятию — д-р техн. наук, проф. Г. М. Волков, разд. II и задания к лабораторным работам № 1—4 написали совместно д-р техн. наук, проф. Г. М. Волков и канд. техн. наук, проф. В. М. Зув.

### Глава 1

## КЛАССИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ

### 1.1. Роль материалов в развитии техники

Прогресс человечества неразрывно связан с его умением обрабатывать и производить жизненно важные материалы. В истории цивилизации такого рода материалы определяли название целых эпох: каменный век, бронзовый век, железный век. Начало праистории человечества (800 — 12 тыс. лет до н. э.) связано с освоением природных материалов, таких как кремень, кварцит, обсидиан (вулканическое стекло), нефрит, что и определило название этого периода в исторической литературе как каменный век. В каменном веке в обиходе использовались также и другие природные материалы (дерево и кости), но камень занял особое место в их жизни — из него с помощью примитивной техники скалывания они изготавливали первые грубые виды оружия для охоты и защиты и орудия труда, в их числе наконечники стрел, топоры, ножи. При этом важно отметить, что именно с помощью кремня около 500 тыс. лет тому назад первобытные люди смогли добыть огонь. Поддерживая постоянно огонь в кострах, они получили обожженную глину, позже стали изготавливать из нее в процессе обжига необходимые предметы домашней утвари, т. е. уже в первобытном обществе получила развитие технология изготовления керамики.

Древние искатели камней, исследуя свои находки в огне костров, получили первый опыт расплавления некоторых пород, среди которых встречались и кусковые легкоплавкие руды (малахит, болотные и луговые железные руды и др.), и самородные природные элементы, в том числе самородные металлы (медь, золото, серебро, олово, сурьма, платина), а также неметаллы (сера, мышьяк). Однако потребовалось не одно тысячелетие для накопления опыта, пока люди не научились в огне костров и примитивных земляных печей изменять свойства этих природных веществ. Открытие выплавления меди и некоторых сортов железа связывают с огромными лесными пожарами, во время которых поверхностные породы и находящиеся на по-

верхности самородки расплавлялись, а руда восстанавливалась до чистого металла.

Примитивные изделия из меди, которые найдены в раскопках, относят к 7-му тысячелетию до н. э., к четвертому тысячелетию до новой эры относится начало изготовления инструментов из сплавов на основе меди с оловом, а позже и с другими металлами. Данные сплавы, называемые бронзами, имеют лучшие свойства, чем медь. Инструмент из бронзы прочнее медного.

Железо как самородный металл в природе не встречается, однако задолго до появления технологии выплавки железа из руд и горячей его обработки древние мастера знали этот металл и умели ударами молотка изменять его форму. Археологически доказанным является факт использования первобытными мастерами метеоритного железа. Само слово «железо» на языке многих древних народов отражает его космическое происхождение. Например, по-гречески «железо» — «сидерос», что означает «звезда, метеорит», египтяне называли его «родившееся на небе», шумеры — «небесной медью», т. е. знания о данном металле древние люди получили задолго до того, как научились выплавлять этот металл из земных руд.

Самое древнее изделие из железа — кинжал, найденный в древних захоронениях на юге Месопотамии, был изготовлен методом холоднойковки из метеоритного железа примерно в 3100 г. до н. э., т. е. более 5000 лет тому назад.

Земная цивилизация в том виде, в котором она сложилась, базируется, однако, не на экзотических штучных изделиях из редкого метеоритного железа, а на широком использовании железа, выплавляемого из железных руд и представляющего собой основной технический материал, доступный для всех слоев населения. В отличие от сравнительно редких месторождений меди, и в особенности олова, железные руды, такие как бурые железняки, встречаются повсюду. Легко перерабатываемые породы железных руд — луговые, озерные, болотные бурые железняки — залегают у самой поверхности.

Железо быстро вошло в разряд незаменимого металла, положив начало железному веку. Из него кузнецы стали делать мотыги, лемехи, серпы, ножи, топоры, лопаты, вилы, кирки, косы, секачи, ножницы для стрижки овец, а позже для стрижки волос, кузнечные меха, клещи, двуручные пилы, зубила, молоты и многое другое. Таким образом, жизнь людей с появлением этих инструментов качественно изменилась к лучшему, и именно поэтому железо уже многие столетия является самым демократичным из металлов.

С начала промышленной революции в конце XVIII в. и по настоящее время сплавы железа с углеродом — сталь и чугуны — являются основными конструкционными материалами для изготовления деталей машин и оборудования практически во всех отраслях промышленного производства. Началось осмысленное изучение всего того, что накопило человечество за все время использования метал-

лов. В России первым, кто начал научно осмысливать проблемы металлургии и литейного дела, был М. В. Ломоносов. Им написано учебное руководство «Первые основания металлургии или рудных дел». Большой вклад в разработку теоретических основ металлургии принадлежит российским ученым разных периодов истории, среди них Д. И. Менделеев, А. А. Бочвар, Н. С. Курнаков, А. А. Байков, И. П. Бардин и многие другие.

Основоположителем научного металловедения является выдающийся русский ученый металлург Д. К. Чернов. Впервые в мире определив температуры критических точек стали, он в 1868 г. ввел их обозначения, которыми пользуются до сих пор металловеды всего мира, и показал практические возможности использования этих данных, в частности, при термической обработке стали. С этого момента металлургии и металловеды вместо набора эмпирических рецептов начали применять научные методы управления структурой и свойствами металлических материалов.

Предпосылкой к открытию критических точек явились работы русского инженера П. П. Аносова, который несколькими десятилетиями ранее (в 1831 г.) также впервые в мире применил микроскоп при исследовании структуры стали. В истории металлургии П. П. Аносов больше известен своим открытием утерянного в веках секрета производства оружейной стали — булата, обладающего уникальным для металла сочетанием свойств большой прочности, твердости и упругости. По отзывам очевидцев, настоящим булатным клинком можно рубить гвозди и сразу же после этого рассекать подброшенный в воздух шелковый платок. Для дальнейшей демонстрации качества клинка мастера обертывают его вокруг своей талии, как пояс.

Бурный рост промышленного производства в XX в. привел к созданию новых, в том числе неметаллических материалов с самыми разными свойствами. Создан принципиально новый класс материалов — полимеры, свойства которых резко отличаются от свойств металлов. В настоящее время полимеры широко применяются во многих областях техники. Сочетание требуемого уровня химических, физических и механических свойств с низкой стоимостью и технологичностью при изготовлении деталей сложной конфигурации делает их незаменимым материалом для машиностроения. Большой вклад в развитие физики и химии полимеров внесли отечественные ученые А. М. Бутлеров, Н. Н. Семенов, В. А. Каргин, К. А. Андрианов и многие другие.

Дальнейшее развитие техники невозможно без создания материалов с уникальными свойствами. Работоспособность конструкций атомной и термоядерной энергетики, а также ракетно-космической техники могут обеспечить только новые материалы, способные работать в экстремальных условиях эксплуатации. Широкое развитие информационных технологий в самых разных сферах деятельности

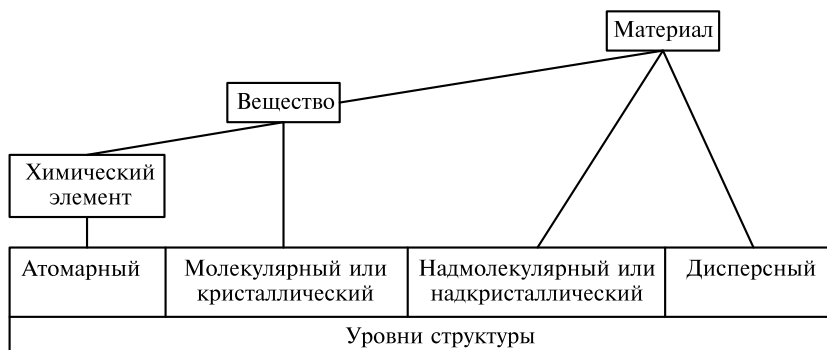


Рис. 1.1. Классификация структуры материалов

также стало возможным только с появлением новых материалов с особыми электрофизическими свойствами.

*Материаловедение* — это раздел научного знания, посвященный созданию новых материалов с заранее заданными рабочими характеристиками, а также изучению и целенаправленному изменению свойств существующих материалов. Фундаментальной базой материаловедения являются все разделы физики, химии, механики, которые включают в себя теоретические основы современных наукоемких технологий получения, обработки и применения материалов.

*Материалами* называют твердые тела с известными свойствами, которые определяются их составом и строением. На практике следует различать вещество и созданный из него материал. В отличие от вещества материал на его основе обладает комплексом свойств в макрообъеме, достаточном для технического применения. Следует учитывать, что в большинстве случаев практическое применение в технических устройствах находит именно материал, а не составляющее его вещество.

Свойства материала зависят от химического состава и пространственной ориентации его составляющих, которую объединяют одним термином — *структура* (рис. 1.1).

Сфера научных интересов материаловедения сосредоточена на исследовании триединого сочетания состав — структура — свойство, или сокращенно С — С — С. Эта аббревиатура достаточно емко характеризует материаловедение как науку.

## 1.2. Химические вещества

**Атом химического вещества.** Наука рассматривает *химическое вещество* как основной, наряду с физическим полем, вид материи, составляющей любое физическое образование, т. е. все то, что зани-



мает пространство и имеет твердое, жидкое или газообразное агрегатные состояния. Для отличия одного химического вещества от другого используют набор констант, в числе которых относительная атомная масса, плотность, температура плавления, температура кипения, термодинамические характеристики, в частности запас внутренней энергии и химические свойства. Наименьшей частицей простого вещества, еще сохраняющей его химические свойства, является *атом*, т.е. атом — это предел химического разложения любого вещества. Различают вещества *простые* (состоят из атомов одного вида) и *сложные* (состоят из атомов разных видов).

Наименьшей частицей химического соединения, обладающей его химическими свойствами, является *молекула* — микрочастица, способная существовать самостоятельно. Молекулы простого вещества могут содержать разное число атомов, например, гелий He, аргон Ar, неон Ne являются одноатомными молекулами простых газов; водород H<sub>2</sub>, азот N<sub>2</sub>, кислород O<sub>2</sub> — двухатомными. Молекулы сложного вещества содержат атомы разных видов, например, оксид углерода, или угарный газ CO, — это двухатомная молекула сложного вещества, а диоксид углерода, или углекислый газ CO<sub>2</sub>, и водяной пар H<sub>2</sub>O — это трехатомные молекулы сложного вещества. Молекула аммиака NH<sub>3</sub> построена из четырех атомов, а молекула метана CH<sub>4</sub> — из пяти.

Все виды известных науке атомов указаны в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева (для краткости — Периодическая система).

*Протоны* и *нейтроны* составляют положительно заряженное *ядро атома* (заряд ядру придают протоны, тогда как нейтроны электрически нейтральны), а отрицательно заряженные *электроны* вращаются на своей орбите вокруг ядра. Каждый химический элемент — это физическое образование из атомов с одинаковым числом протонов (данное число определяет атомный, т.е. порядковый номер элемента в Периодической системе). Масса каждого из атомов вещества сосредоточена в ядре, тогда как масса электронов очень мала в сравнении с массой ядра. Масса атомов разных видов колеблется в пределах  $10^{-24} \dots 10^{-22}$  г, их диаметр может составлять 0,1...0,5 нм (1 нм =  $1 \cdot 10^{-9}$  м).

Отрицательно заряженные электроны в системе каждого атома притягиваются противоположно заряженными ядрами, но не становятся их частью, а вращаются вокруг них по строго определенным энергетическим орбитам, т.е. находятся на определенных энергетических уровнях, называемых электронными оболочками или орбиталями. Таким образом, каждый атом вещества — это сложная энергетически уравновешенная система (атом нейтрален, так как заряд положительного ядра скомпенсирован отрицательным зарядом электронов), по совокупности определяющая параметры состояния каждого вещества — его удельный объем, плотность, концентрацию, внутреннюю энергию, энтропию и др.

*Атомарный уровень структуры* определяет все свойства химического элемента, в том числе его цвет. Последнее свойство можно использовать при визуальном анализе. По цвету можно отличить, например, золото от серебра, менее уверенно таким способом можно отличить медь от золота, поскольку их цвета схожи. В данном случае для разделения этих химических элементов следует воспользоваться другими методами анализа, например определить их плотность (золото при 20 °С имеет плотность 19,3 г/см<sup>3</sup>, а медь — 8,9 г/см<sup>3</sup>) или исследовать их химическое взаимодействие с азотной кислотой: медь с ней взаимодействует, а золото на нее не реагирует, хотя в смеси азотной и соляной кислот в соотношении 1 : 3 («царская водка») золото хорошо растворяется.

Атомарная модель дает представление также о типе химической связи — взаимном сцеплении атомов вещества под действием электронных сил притяжения и, как следствие, о характере строения вещества, его атомарной структуре.

Для некоторых веществ характерно хаотичное расположение атомов, молекул или ионов в пространстве. Такие вещества называют *аморфными*. К веществам с аморфной структурой относится, например, стекло.

Вещества с упорядоченным расположением атомов называют *кристаллами*. Как пример, кристаллическую структуру имеют все металлы.

### 1.3. Типы химической связи

В зависимости от строения внешних электронных орбит атомов между ними возможна реализация межатомной связи по нескольким основным вариантам, в соответствии с которыми различают вещества с ионным, ковалентным, металлическим и молекулярным типом связи. Данное разделение достаточно условно, так как во многих реальных материалах действуют одновременно несколько типов связи, обычно для характеристики вещества имеют в виду преобладающий тип связи.

*Ионная связь* определяется электростатическими силами притяжения между положительно и отрицательно заряженными ионами. Ионная связь относится к сильному типу связи, как правило, между атомами металла и неметалла. Типичным примером вещества с ионным типом связи является поваренная соль, при образовании молекулы которой (химическая формула NaCl) атом натрия теряет электрон внешней оболочки и становится положительным ионом натрия — *катионом*, а атом хлора приобретает данный отрицательный электрон, становясь отрицательным ионом — *анионом*. Наиболее известный и широко распространенный материал с ионным типом связи — стекло.

**Ковалентная связь** возникает как результат взаимного перекрытия электронных орбит соседних атомов неметаллов. Электроны не переходят от одного атома к другому, как в случае ионной связи, а становятся общими для обоих атомов, т. е. образуются общие электронные пары. Ковалентная связь обеспечивает большую прочность соединения атомов, определяющую высокие физико-механические свойства образующихся кристаллических веществ, среди которых алмаз, карбид кремния.

**Металлическая связь** характеризуется обобществлением внешних электронов всех атомов рассматриваемого объема вещества, а не только соседних, как в случае ковалентной связи. Коллективизированные электроны образуют так называемый «электронный газ», который и определяет характерные свойства металлов и сплавов на их основе. В образующейся металлической решетке большинство атомов металла, теряя отрицательно заряженные внешние электроны, находятся в ее узлах в виде положительно заряженных ионов. Таким образом, металлическая связь возникает как результат сил притяжения между совокупностью положительно заряженных ионов и отрицательно заряженных свободных электронов, образующих электронный газ. Именно наличие электронного газа определяет такие физические свойства металлов, как высокие тепло- и электропроводность. Отсутствие сильных направленных связей между атомами, характерных для тел с ионным и ковалентным типом связи, определяет одно из важнейших свойств металлов — их пластичность, т. е. способность изменять форму без разрушения. Именно благодаря этому при изготовлении металлопродукции возможно широкое применение методов пластического деформирования —ковки, прокатки, волочения и др.

**Молекулярная связь** возникает в результате мгновенной поляризации заряда атомов при их сближении. В этот момент центр отрицательных зарядов электронов не совпадает с геометрическим центром положительно заряженного ядра, и образуется диполь. Взаимодействие диполей соседних атомов приводит к появлению сил притяжения, называемых ван-дер-ваальсовыми силами (по фамилии впервые исследовавшего их нидерландского ученого Ван-дер-Ваальса).

Молекулярная связь очень слабая по сравнению с остальными типами химической связи. Характерным примером веществ с молекулярной связью могут служить многие органические соединения с низкой температурой плавления и очень малой механической прочностью, например, парафин, нафталин.

## 1.4. Кристаллы

**Основные понятия для идеального кристалла.** Для каждого вещества кристаллическая структура индивидуальна и определяет его основные физико-химические свойства.

Расстояние между соседними атомами кристаллической решетки является результатом динамического равновесия между взаимодействующими силами притяжения и отталкивания атомов. При сближении двух атомов на некотором критическом расстоянии между ними начинают действовать силы отталкивания одноименных зарядов ядер и притяжения разноименных зарядов ядер и электронов в каждом из них. В итоге устанавливается динамическое равновесие сил атомарного взаимодействия при строго определенном расстоянии между атомами решетки, на котором результирующая сил взаимодействия равна нулю ( $F_{\Sigma} = 0$ ) (рис. 1.2, а). Этой точке соответствует геометрический центр соседнего атома 2. Схему взаимодействия атомов в кристаллической решетке иллюстрирует механическая пружинная модель (рис. 1.2, б), в которой удалению шаров (атомов) на большее расстояние препятствует растяжение пружины, а для их сближения необходимо преодолеть усилие сжатия пружины.

В решетке кристалла атомы сближены до соприкосновения их внешних электронных оболочек. Для удобства изучения кристаллического строения веществ пространственное изображение атомов в кристалле вещества (рис. 1.3, а) заменяют схемой *элементарной кристаллической ячейки* (рис. 1.3, б), для получения которой представительное число атомов, взятых для построения пространственного изображения кристаллической решетки (см. рис. 1.3, а), соединяют прямыми линиями. Кристалл представляет собой множество повторяющихся элементарных кристаллических ячеек. Для характеристики элементарной кристаллической ячейки используют ряд основных показателей.

*Параметр*, или *период решетки*, — расстояние  $a$ ,  $b$ ,  $c$  между центрами соседних атомов кристаллической решетки. *Углы*  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  определяют ориентацию осей элементарной ячейки.

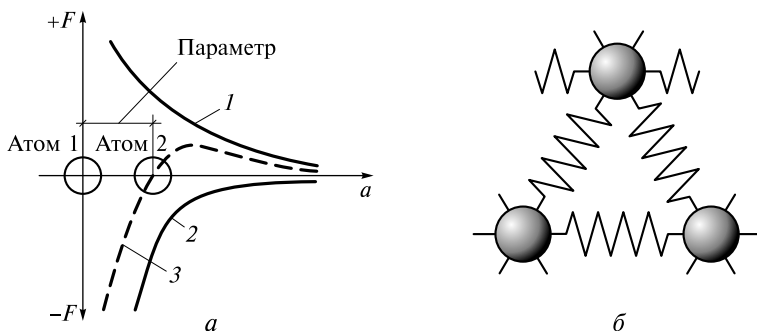


Рис. 1.2. Схема сил атомарного взаимодействия:

$a$  — характер взаимодействия межатомных сил; б — пружинная модель; 1 — силы притяжения ( $+F$ ); 2 — силы отталкивания ( $-F$ ); 3 — результирующая сила взаимодействия атомов ( $F_{\Sigma} = 0$ );  $a$  — расстояние