

**В.А. БЕЛЕВИТИН**

**СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

# МЕТАЛЛЫ

**ЧЕРНЫЕ 90%**

**железо,  
сталь,  
чугун**

**ЦВЕТНЫЕ 10%**

**Тяжёлые**

Медь, цинк,  
свинец, олово,  
никель

**Лёгкие**

Алюминий, титан,  
магний

**Благородные**

Золото, платина,  
серебро

**Редкоземельные**

Цирконий, селен,  
германий

*В. А. Белевитин*

**СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие

Челябинск

2017

ББК 30.3я73  
УДК 620.1 (021)  
Б 43

Белевитин В.А. Строение и свойства конструкционных материалов: учебное пособие / В.А. Белевитин. – Челябинск: Изд-во «ЦИЦЕРО», 2017. – 69 с.: с ил.

ISBN 978-5-91283-893-4

В учебном пособии представлены наиболее современное состояние понятийного аппарата относительно строения и свойств основных металлических и неметаллических конструкционных материалов, применяемых в автомобилестроении соответственно специфики подготовки педагога профессионального обучения по специальности «Профессиональное обучение (автомобили и автомобильное хозяйство)».

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Профессиональное обучение (автомобили и автомобильное хозяйство)».

**Рецензенты:**

Г.А. Орлов, докт. техн. наук, проф., Уральский  
федеральный университет им. Первого  
президента России Б.Н. Ельцина;  
К.Н. Семендяев, канд. техн. наук, зам. дир-ра ЮУГТК

ISBN 978-5-91283-893-4

© Белевитин В.А., 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....   | 4  |
| <b>Глава 1. Строение и свойства<br/>конструкционных материалов</b> .....                      | 6  |
| 1.1. Классификация конструкционных материалов<br>и общие требования, предъявляемые к ним..... | 6  |
| 1.2. Основные понятия и определения о строении<br>металлов и сплавов.....                     | 12 |
| 1.3. Дефекты кристаллического строения металлов....   | 18 |
| 1.4. Полиморфные модификации металлов.....  | 38 |
| Контрольные вопросы по главе 1.....   | 42 |
| <b>Глава 2. Неметаллические материалы</b> .....   | 43 |
| 2.1. Пластмассы – неметаллические<br>полимерные материалы.....                                | 44 |
| 2.2. Основные области применения<br>пластмасс в машиностроении.....                           | 56 |
| Контрольные вопросы по главе 1.....   | 61 |
| <b>БИБЛИОГРАФИЯ</b> .....   | 62 |

## ВВЕДЕНИЕ

Материаловедением называют прикладную науку, изучающую взаимосвязь между составом, строением и свойствами материалов. Эффективное решение важнейших технических проблем, связанных с экономией материалов, уменьшением массы машин и приборов (как одной из важных составляющих ресурсосбережения – металлоемкости), повышением точности, надежности и работоспособности деталей, узлов и механизмов во многом зависит от успехов в развитии материаловедения.

Теоретической основой материаловедения являются соответствующие разделы физики и химии, однако наука о материалах в основном развивается экспериментальным путем. Поэтому дальнейшему развитию материаловедения способствует разработка новых методов исследования и конструирования строения (структуры) и физико-химических свойств конструкционных материалов.

Основу конструкционных материалов составляют металлы и сплавы. Использование неметаллических материалов в промышленности невелико (около 10–12%), поэтому основное внимание в учебном пособии уделено строению металлов и сплавов.

Особенностью данного учебного пособия, в отличие от известных пособий по данной дисциплине, является намерение представить наиболее полно базовые разделы материаловедения с учетом профиля подготовки педагогов профессионального обучения по специальности «Профессиональное обучение (автомобили и автомобильное хозяй-

ство)». Отличительной стороной учебного пособия является включение ряда специальных сведений об основных технологических и эксплуатационных свойствах конструкционных материалов и об изменениях их в зависимости от химического состава, структуры и способов обработки.

В связи с переходом общества в новую – постиндустриальную – стадию развития в направлении стратегических приоритетов структурной перестройки экономики наметилась тенденция ресурсосбережения. Снижение энерго- и металлоемкости транспортных средств и промышленно используемой автотракторной техники может стать следствием, прежде всего, научно-технического прогресса в области совершенствования структуры и качества конструкционных материалов, детерминирования интегральной технологической компетентности будущих специалистов – выпускников учреждений среднего и высшего профессионального образования.

# Глава 1

## СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

---

### 1.1. Классификация конструкционных материалов и общие требования, предъявляемые к ним

Конструкционными называют материалы, предназначенные для изготовления деталей машин, приборов, инженерных конструкций, подвергающиеся механическим нагрузкам. Одновременно с механическими нагрузками различных видов (статическими, ударными, циклическими) в контакте с различными средами (агрессивными, абразивными и др.) конструкционные материалы нередко испытывают влияние высоких и низких температур и других условий эксплуатации.

Перечень конструкционных материалов, применяемых в машино- и приборостроении, велик, и классифицировать их можно по разным признакам. Большинство из них, такие как стали, чугуны, сплавы на основе меди (латуни и бронзы) и легких металлов (алюминия и др.), являются универсальными, обладают многочисленными достоинствами и используются в различных деталях и конструкциях. Конструкционные материалы классифицируют по свойствам, определяющим их выбор для конкретных деталей и конструкций с учетом условий эксплуатации, при этом каждая группа оценивается соответствующими критериями, обеспечивающими работоспособность в эксплуатации:

1. Материалы, обеспечивающие жесткость, статическую и циклическую прочность (стали).

2. Материалы с особыми технологическими свойствами, в том числе износостойкие материалы.

3. Материалы с высокими упругими свойствами, малой плотностью, высокой удельной прочностью.

4. Материалы, устойчивые к воздействию температуры и рабочей среды (коррозионно- и жаростойкие, жаропрочные и пр.).

Универсальные материалы рассматриваются в нескольких группах, если возможность их применения определяется различными критериями.

Факторы влияния (механические нагрузки различных видов, рабочие среды, высокие и низкие температуры и другие условия эксплуатации) определяют требования к конструкционным материалам, основные из которых – эксплуатационные, технологические, экономические.

*Эксплуатационные требования* имеют первостепенное значение. Для обеспечения работоспособности конкретных машин и приборов конструкционный материал должен иметь высокую конструкционную прочность.

*Конструкционной прочностью* называется комплекс механических свойств, обеспечивающих надежную и длительную работу материала в условиях эксплуатации.

Требуемые характеристики механических свойств материала для конкретного изделия зависят не только от силовых факторов, но и воздействий на него рабочей среды и температуры, которые оказывают существенное и преимущественно отрицательное влияние на механические свойства.

ва конструкционных материалов, снижая работоспособность деталей и агрегатов. Чтобы противостоять рабочей среде, материал должен обладать не только механическими, но и определенными физико-химическими свойствами: стойкостью к коррозии, жаро- и кислотостойкостью, способностью работать при низких и высоких температурах: от  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в отдельных случаях до  $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для обеспечения работоспособности при высокой температуре от конструкционного материала требуется жаропрочность, а при низкой температуре – хладостойкость.

В некоторых случаях важны также требования определенных магнитных, электрических и иных свойств.

*Технологические требования* (технологичность материала) направлены на обеспечение наименьшей трудоемкости изготовления деталей и конструкций. Технологичность материала характеризует возможные методы его обработки и оценивается обрабатываемостью резанием, давлением, сваркой, литейными свойствами, способностью к термической и химико-термической обработке, другими способами, имеет важное значение, так как от нее зависят производительность и качество изготовления деталей.

*Экономические требования* сводятся к тому, чтобы материал имел невысокую стоимость и был доступным. Стали и сплавы должны содержать по возможности минимальное количество легирующих элементов, как правило, редких и дорогостоящих. Экономические требования так же, как и технологические, приобретают особое значение при массовом производстве.

Качественный конструкционный материал должен, таким образом, удовлетворять комплексу, совокупности требований, определяемых, в первую очередь, строением металлов и сплавов [1–37].

Наука о внутреннем строении металлов и сплавов называется *металлографией*.

Значение металлографии определяется основным правилом металловедения, науки изучающей зависимость между составом, строением и свойствами металлов и сплавов в зависимости от их изменения под внешним воздействием теплового, химического, механического влияния и потоков высокой энергии (электромагнитных, радиоактивных, плазменных и др.). Согласно этому правилу все свойства металлов и сплавов (механические, физические, химические и технологические) зависят только от двух основных факторов – химического состава и внутренней структуры.

Впервые существование связи между строением стали и ее свойствами было установлено П.П. Амосовым (1799–1851 гг.). Микроскопический метод изучения металлов и сплавов был введен в науку английским исследователем Г. Срби, первая статья которого о микроструктуре стали была опубликована в 1864 г.

Всемирно признанным основоположником научного металловедения является русский металлург Д.К. Чернов (1839–1921 гг.), открывший полиморфизм стали, изложивший в 1876 г. основы современной теории кристаллизации металлов, создавший фундамент современного металловедения и термической обработки стали. В 1882 г.

Ф. Осмондом (Франция) была впервые применена микрофотография как метод изучения структуры металлов.

В начале XX века большую роль в развитии металловедения сыграли работы Н.С. Курнакова (1860–1941 гг.) и его учеников, применивших для исследования металлов методы физико-химического анализа (электрический, dilatометрический, магнитный и др.). Разработка теории и технологии термической обработки стали связана с именами С.С. Штейнберга (1872–1940 гг.), Н.А. Минкевича (1883–1942 гг.). Исследованию механизма и кинетики фазовых превращений в металлических сплавах посвящены работы российских ученых С.Т. Конобеевского, А.А. Быйкова, В.Д. Садовского, А.А. Бочвара и многих других.

Среди зарубежных ученых большой вклад в изучение железо-углеродистых сплавов внесли А. Ле-Шателье (Франция), Р. Аустен (Англия), Ф. Осмонд (Франция) и др. Важнейшие рентгеноструктурные исследования сплавов выполнили М. Лауэ и П. Дебай (Германия), У.Г. Брэгг и У.Л. Брэгг (Англия). Широко известны работы Э. Бейна, Р. Мейла (США) и Велера (Германия) в области теории фазовых превращений.

Объединенными усилиями экспериментаторов и теоретиков, среди которых следует отметить В.Т. Ридда (США), А.Х. Коттрелла (Англия), Ж. Фриделя (Франция), Я.И. Френкеля, Г.В. Курдюмова, И.А. Одингга и В.И. Трофимова (Россия), А. Зегера (Германия) и др., учение о нарушениях (дефектах) кристаллической структуры стало базой, на которой развиваются современные представле-

ния о природе прочности, пластичности, разрушения металлов и сплавов.

## 1.2. Основные понятия и определения о строении металлов и сплавов

М.В. Ломоносов определял металлы как «светлые тела, которые ковать можно». Это простейшее определение не потеряло значения и сейчас. К металлам относят большинство химических элементов периодической системы Менделеева. Металлы в твердом и отчасти в жидком состоянии обладают рядом характерных свойств:

- 1) высокой тепло- и электропроводностью;
- 2) положительным температурным коэффициентом электросопротивления: с повышением температуры электросопротивление чистых металлов возрастает;
- 3) термоэлектронной эмиссией, то есть могут испускать электроны при нагреве;
- 4) хорошей отражательной способностью: металлы непрозрачны и обладают металлическим блеском;
- 5) повышенной способностью к пластической деформации, то есть к деформации, при которой после снятия (удаления) приложенных сил (нагрузки) тело не восстанавливает своей первоначальной формы и размеров.

Наличие таких свойств и характеризует так называемое *металлическое состояние вещества*. Для металлов характерен особый вид так называемой «металлической связи». Взаимодействие электронов внешних оболочек различных атомов создает такую связь (силы сцепления) между атомами металла. В результате этого сцепления ионы рас-

полагаются в пространстве в геометрически правильном порядке с определенной закономерностью в форме кристаллических решеток и удерживаются один возле другого электронным «газом» (рис. 1.1). При этом ионы (ядра атомов) совершают только малые колебания около своих равновесных положений в кристаллических решетках, а электроны могут свободно перемещаться в решетке, обеспечивая хорошую тепло- и электропроводность, которые снижаются с повышением температуры.

Порядок расположения атомов в кристаллической решетке может быть различным, расстояния между центрами атомов (параметры решеток) и углы между осями решетки для различных металлов неодинаковы. Атомные связи различаются в основном по характеру сил притяжения, так как энергия отталкивания (рис.1.2), как правило, связана с деформацией электронных оболочек атомов и существенна на расстояниях, меньших или равных диаметру атома.

Металлы представляют собой поликристаллические тела, состоящие из большого числа мелких ( $10^{-1}$ – $10^{-4}$  см), различно ориентированных один по отношению к другому кристаллов. Расстояние между атомами в кристалле  $r = r_0$  (рис. 1.2), соответствующее минимуму энергии системы  $U_0$ , определяется равенством конкурирующих сил притяжения и отталкивания между валентными электронами и ионами. Минимальная потенциальная энергии  $U_0$  и определяет *энергию связи*, которая равна работе, необходимой для удаления соседних атомов на бесконечно большое расстояние.

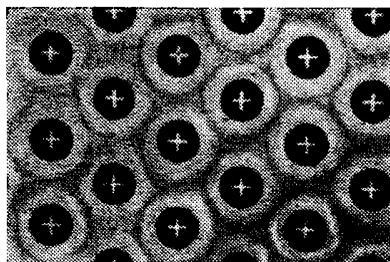


Рис. 1.1. Схема строения металла: в углах кристаллической решетки находятся положительно заряженные ионы, в промежутках движутся валентные электроны

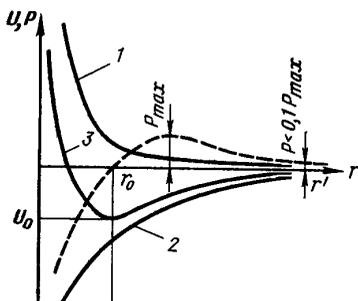


Рис. 1.2. Изменение потенциальной энергии ( $U$ ) при наличии только сил отталкивания (1), только сил притяжения (2), полной энергии (3) и силы взаимодействия пары атомов  $P$  (штриховая линия) в зависимости от расстояния  $r$  между ними

Минимально возможное число атомов, характеризующее пространственную закономерность их расположения, называют *элементарной ячейкой*, наиболее распространенные из которых для металлов представлены на рис. 1.3.

В элементарной ячейке кристаллической решетки в виде центрированного куба (объемноцентрированная кубическая – ОЦК, рис.1.3, а) располагается 9 атомов, из которых

8 атомов – по вершинам куба и один – в его центре. ОЦК решетка, характерная для Li, Na, K, Rb, Cs, Ca ( $T > 464^\circ\text{C}$ ), Ba, Ti( $\beta$ ), Zr( $\beta$ ), Hf( $\beta$ ), V, W, Nb, Ta, Cr, Mo, Mn( $\delta$ ), Fe( $a$  и  $\delta$ ) и других металлов, является наименее плотноупакованной («рыхлой»).

В элементарной ячейке кубической решетки с центрированными гранями (гранецентрированная кубическая – ГЦК, рис. 1.3, б) располагается 14 атомов, из которых 8 атомов – по вершинам куба и шесть – в центре каждой из граней. Такую решетку образуют Cu, Ag, Au, Al, Th, Pb, Co( $\beta$ ), Ni, Ir, Pt и другие металлы.

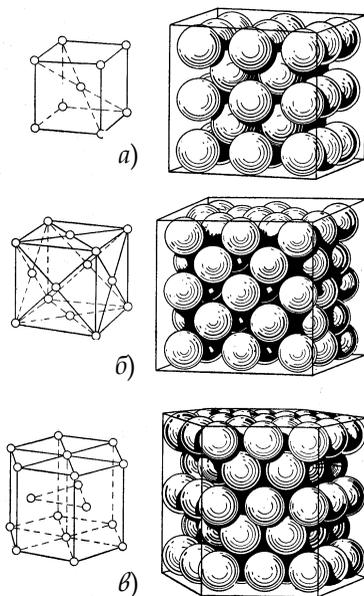


Рис. 1.3. Типы элементарных ячеек кристаллических решеток (слева – схема, справа – пространственное изображение):

*a* – объемноцентрированная кубическая (ОЦК);

*б* – гранецентрированная кубическая (ГЦК);

*в* – гексагональная плотноупакованная (ГПУ)

В элементарной ячейке гексагональной решетки с плотной упаковкой атомов (гексагональная плотноупакованная – ГПУ, рис. 1.3, б) располагается 17 атомов, из которых 12 атомов – по вершинам решетки, имеющей форму правильной шестигранной призмы, 2 – в центрах верхнего и нижнего ее оснований и 3 – в средней части ячейки. Такую решетку образуют Mg, Cd, Re, Os, Ru, Zn, Be, Ti(*a*), Hf(*a*), Ca(*a*), La(*a*), Zr(*a*) и другие металлы.

ГЦК и ГПУ решетки, различающиеся между собой характером укладки слоев с максимально возможной плотной упаковкой атомов и характером их чередования, являются наиболее плотноупакованными. Различие в энергетическом отношении этих кристаллических структур незначительное, поэтому последовательность чередования слоев с максимально возможной плотной упаковкой атомов может легко нарушаться во время пластической деформации с образованием так называемых дефектов упаковки. Коэффициент компактности ГПУ решетки (0,7405) больше коэффициента компактности ОЦК решетки (0,68) в 1,09 раз, что соответствует заполнению объема ОЦК решетки атомами, равному 68%, а ГПУ решетки 74%, то есть объем пустот в междоузлиях (межатомных объемов) у ОЦК решетки на 6% больше, чем у ГПУ решетки.

Некоторые металлы имеют тетрагональную решетку (Sn( $\beta$ ), In).

Размеры кристаллической решетки характеризуются выраженными в нанометрах ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ) ее параметрами: у ОЦК и ГЦК – длиной ребра куба  $a = 0,28 \div 0,60 \text{ нм}$ , у ГПУ – стороной шестигранника  $a$  и высотой призмы  $c$ ,

и когда  $c/a = 1,633$ , атомы упакованы наиболее плотно по сравнению с другими типами кристаллических решеток.

Технические металлы и сплавы представляют собой поликристаллические тела, состоящие из большого числа мелких ( $10^{-1} \div 10^{-4}$  см), различно ориентированных один по отношению к другому кристаллов из множества упорядоченных ячеек кристаллических решеток. Плотность атомов в кристаллических решетках в разных плоскостях и направлениях неодинаковая, из-за чего многие свойства (химические, физические, механические) каждого кристалла зависят от направления решетки. Такая неодинаковость свойств кристалла в разных кристаллографических направлениях называется *анизотропией*.

В тех случаях, когда при затвердевании (кристаллизации) металла не наблюдается условий для преимущественной ориентации образующихся кристаллов, они ориентируются произвольно. Поскольку при этом в любом направлении располагается примерно одинаковое количество кристаллов с различной, неупорядоченной друг по отношению к другу ориентацией, свойства металлов и сплавов более или менее одинаковы во всех направлениях, то есть поликристаллические тела являются квазизотропными (приближенно изотропными).

Процесс кристаллизации складывается из двух этапов: зарождения центров (зародышей) кристаллизации (мельчайших кристаллических частиц) и роста зародышей с образованием кристаллов. Вначале рост кристаллов происходит по всем направлениям, а затем, при дальнейшем росте, кристаллы сталкиваются, правильная форма кристаллов

нарушается, и они получают неправильные внешние очертания, вследствие чего их называют не кристаллами, а кристаллитами (рис. 1.4). Кристаллиты бывают двух видов – типа многогранников (зерна, гранулы) или ветвистой формы (дендриты). Поверхности раздела зерен называют *границами зерен*. Кристаллические решетки в отдельных зернах ориентированы друг относительно друга случайным образом. В некоторых случаях, например при холодной прокатке, наблюдается преимущественная ориентация зерен – *текстура*, возникает анизотропия свойств – вдоль и поперек направления прокатки, в частности.

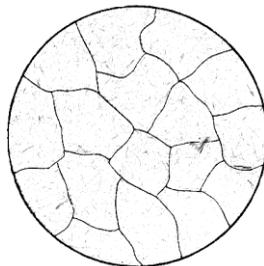


Рис. 1.4. Кристаллиты (зерна) затвердевшего металла

### 1.3. Дефекты кристаллического строения металлов

В реальных кристаллах всегда имеются несовершенства – дефекты кристаллического строения, под которыми понимаются нарушения в периодичности пространственного расположения атомов: не все атомы имеют одинаковое окружение соседних атомов. Отклонения атомов от равновесных положений вследствие тепловых колебаний или упругих смещений к числу дефектов кристаллического строения не относятся.

Дефекты кристаллического строения принято разделять по геометрическому признаку на точечные (нульмерные), линейные (одномерные), поверхностные (двухмерные) и объемные (трехмерные).

### 1.3.1. Точечные дефекты

Эти дефекты (рис. 1.5) малы во всех измерениях, их размеры по всем направлениям не превышают нескольких атомных диаметров. К таким несовершенствам кристаллического строения относятся вакансии, межузельные атомы и их комплексы, примесные атомы внедрения и замещения, а также комбинации этих несовершенств.

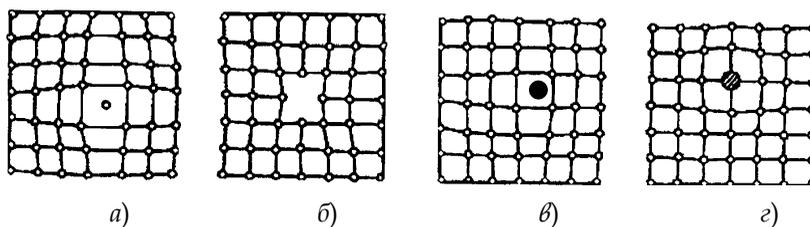


Рис. 1.5. Типы точечных дефектов кристаллической решетки: межузельный атом (*a*), вакансия (*б*), примесный атом внедрения (*в*), примесный атом замещения (*г*)

Вакансии или «дырки» (дефекты Шоттки) представляют собой узлы кристаллической решетки, в которых отсутствуют атомы (рис. 1.5, *б*). Межузельные атомы (рис. 1.5, *а*) являются как бы избыточными атомами и располагаются в междуузлиях (микропорах). Аналогичные позиции занимают примесные атомы внедрения (рис. 1.5, *в*), образуя, тем самым, твердый раствор внедрения. Примесные атомы могут располагаться и в узлах кристаллической решетки (рис. 1.5, *г*), занимая места атомов основного компонента с образованием твердого раствора замещения. Примесные атомы замещения и вакансии могут находиться в любых узлах решетки, и атомы внедрения располагаются лишь в

наиболее крупных пустотах (кристаллографических порах) между атомами кристаллической решетки.

В узлах кристаллической решетки атомы колеблются с частотой  $\sim 10^{13} \text{ с}^{-1}$  и, взаимодействуя благодаря колебательному движению с соседними атомами, обмениваются кинетической энергией. За счет флуктуации кинетической энергии атомы преодолевают потенциальные барьеры с выходом из узлов кристаллической решетки. Вакансии чаще образуются в результате перехода атомов из узлов решетки на поверхность (границу зерна, пустоты, трещины и т.д.), реже в результате перехода в междоузлие с одновременным образованием дополнительно еще одного вида точечных дефектов – межузельного (дислоцированного) атома, что представляет собой парный дефект Френкеля (рис. 1.6).

Межузельные атомы и вакансии вызывают упругие искажения в кристаллической решетке: вакансии можно рассматривать как центр всестороннего локального растяжения, а межузельный атом – локального сжатия (рис.1.6, а). Из теории упругого поля следует, что напряжения и деформации вокруг таких центров убывают обратно пропорционально третьей степени расстояния от него. Заметные смещения соседних атомов из равновесных положений создаются на расстоянии одного-двух атомных диаметров. Быстрое затухание атомных смещений при удалении от центра точечного дефекта свидетельствует о том, что поля напряжений здесь *близкодействующие*.

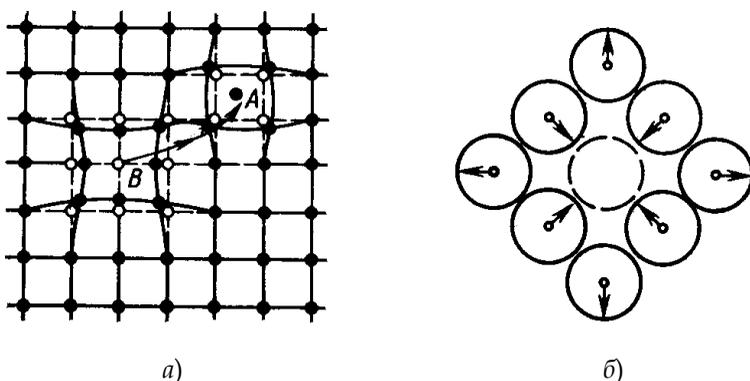


Рис. 1.6. Межузельный (дислоцированный) атом  $A$  и вакансия  $B$  образуют в кристаллической решетке парный эффект Френкеля ( $a$ ) со смещением атомов вокруг вакансии ( $a$  и  $b$ ) и межузельного атома ( $a$ )

Межузельный атом смещает близлежащих соседей на расстояние, равное 20% от межатомного, что приводит к более существенному повышению напряжений и деформаций, чем при образовании вакансий. Поэтому энергетические затраты (энергия активации) на их образование в 3–4 раза выше, чем для вакансий. Следствием этого является тот факт, что их концентрация несоизмеримо меньше, чем вакансий и вакансии являются основными точечными дефектами (не считая примесных атомов).

На концентрацию точечных дефектов, кроме температуры (тем больших, чем выше температура), оказывают влияние резкое охлаждение, высокая степень деформации кристалла (например ковкой), а также облучение металлов потоками высокой энергии (радиационное облучение и пр.). В последнем случае количество дефектов зависит не

от температуры, а от природы кристалла и энергии бомбардирующих быстрых частиц, которые соударяются с атомами и выбивают их из положения равновесия, образуя дефекты Френкеля.

### 1.3.2. Линейные дефекты

Линейные дефекты (несовершенства) кристаллической решетки имеют размеры, близкие к атомным расстояниям в двух измерениях и значительную протяженность в третьем измерении. К этому виду дефектов относятся *дислокации*, простейшими из которых являются *краевые, винтовые и смешанные*.

Краевая дислокация может быть образована сдвигом одной части кристалла относительно другой на одно межатомное расстояние (рис. 1.7). В этом случае в верхней части кристалла образуется одна дополнительная плоскость  $AA'B'B$ , называемая *экстраплоскостью*.

Экстраплоскость действует как клин, создавая сильное искажение кристаллической решетки, особенно в окрестности атомов, расположенных на линии дислокации  $AB$ . Выше края экстраплоскости, что обозначено значком  $\perp$ , слой  $I$  кристаллической решетки растянут, а слой  $II$  (ниже края экстраплоскости) сжат, т.е. выше края экстраплоскости межатомные расстояния больше, а ниже – меньше, чем в неискаженной решетке. Атом на краю экстраплоскости имеет меньше соседей, чем атом, находящийся внутри совершенного участка решетки. Таким образом, вдоль края экстраплоскости тянется область несовершенной решетки, называемая *краевой дислокацией*. Если экстраплоскость расположена сверху, дислокацию называю

положительной и обозначают значком  $\perp$ , а если – снизу, то дислокацию называю отрицательной и обозначают значком  $\Upsilon$ . Такое различие является условным, но учет знаков важен для анализа взаимодействия дислокаций. Положительные и отрицательные дислокации движутся в плоскости скольжения  $ABCD$  в противоположных направлениях, создавая сдвиг одного и того же знака.

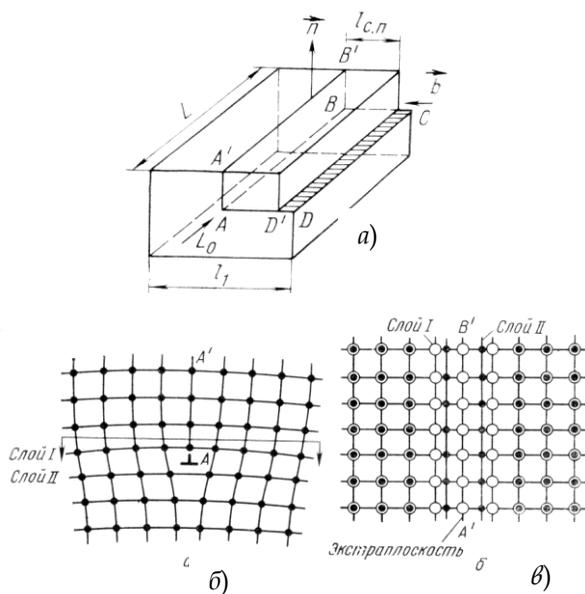


Рис. 1.7. Краевая дислокация: а – сдвиг, создавший краевую дислокацию; схема расположения атомов у краевой дислокации: б – вид сбоку, в – вид сверху (светлые кружки соответствуют атомам слоя I, черные – атомам слоя II)

В ядре дислокации диаметром приблизительно два межатомных расстояния с центром у края экстраплоскости наблюдается наибольшее искажение кристаллической

решетки. Можно представить, что данная область несовершенства находится внутри трубы, осью которой является край экстраплоскости, а протяженность (длина трубы) равна длине экстраплоскости. Вне этой трубы строение кристалла близко к идеальному.

Кроме краевых различают еще винтовые дислокации, которые располагаются параллельно направлению сдвига (линия  $AD$  на рис. 1.8,  $a$ ). При наличии винтовой дислокации кристалл можно рассматривать как состоящий из одной атомной плоскости, закрученной в виде винтовой поверхности (рис. 1.8,  $b$ ). Наиболее полное представление о винтовой дислокации и ее отличиях от краевой дислокации дает модель Вольтерра (рис. 1.9).

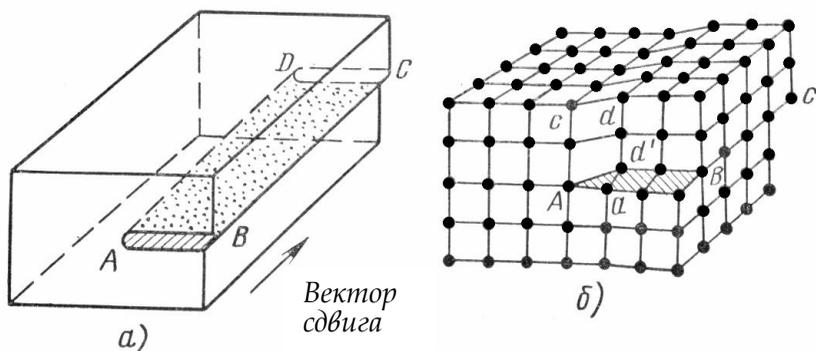


Рис. 1.8. Винтовая дислокация:  $a$  – сдвиг, создавший винтовую дислокацию;  $b$  – схема расположения атомов

Дислокации окружены силовыми полями упругих напряжений, которые взаимодействуют между собой при движении дислокаций. Дислокации, расположенные в одной плоскости скольжения и обладающие одинаковым

знаком, отталкиваются одна от другой (рис. 1.10, *a*), а если они разного знака, то взаимно притягиваются (рис. 1.10, *б*) и их сближение заканчивается аннигиляцией: две экстра-плоскости сливаются в единую полную атомную плоскость.

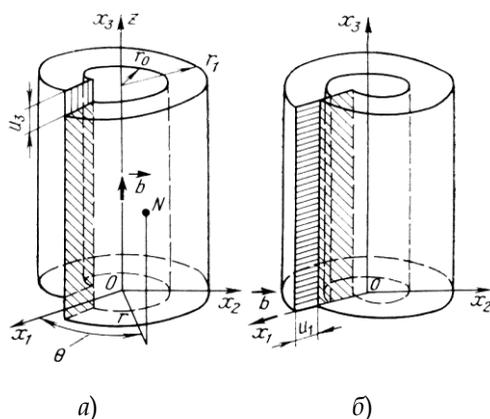


Рис. 1.9. Модель Вольтерра для винтовой (*a*) и краевой дислокаций (*б*) с направлением их вдоль оси  $Ox_3$  ( $Oz$ )

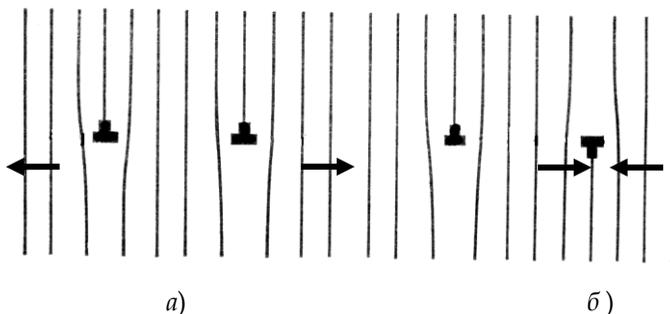


Рис. 1.10. Схема взаимодействия дислокаций, расположенных в одной плоскости скольжения:  
*a* – одного знака; *б* – разных знаков

Если разноименные дислокации находятся в соседних плоскостях скольжения, разделенных межатомным расстоянием (рис. 1.11, *а* и *б*), то после их сближения образуется цепочка вакансий (рис.1.11, *б*) или межузельных атомов (рис. 1.11, *г*), оказавшаяся «лишней» при слиянии экстраплоскостей в одну полную плоскость.

Дислокации не могут обрываться внутри кристалла. Они могут прерываться на других дислокациях или на границах раздела (границы зерен, поверхность кристалла и т.д.), разветвляться на несколько дислокаций с образованием узла или формировать замкнутое кольцо (рис. 1.12).

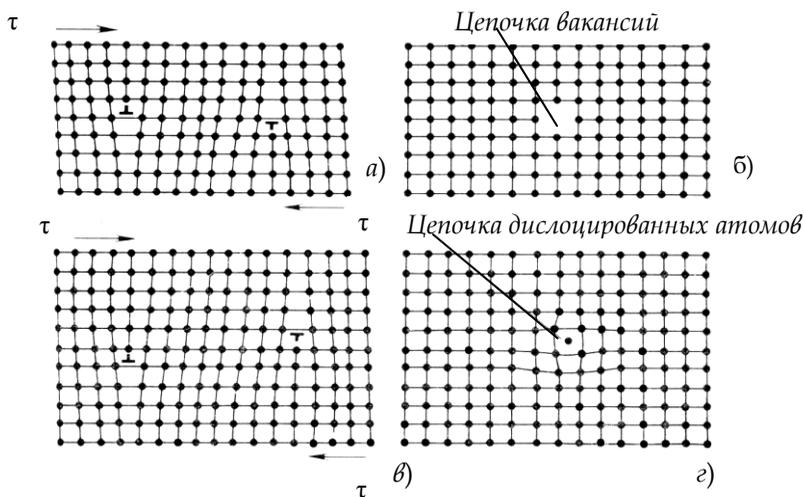


Рис. 1.11. Схема аннигиляции линейных разноименных дислокаций, расположенных в параллельных плоскостях скольжения (*а* и *б*) с образованием цепочек вакансий (*б*) и дислоцированных в межузлии атомов (*г*)

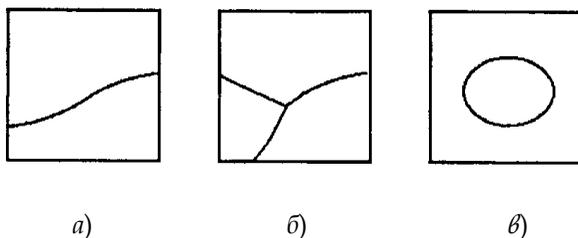


Рис.1.12. Схема выхода дислокации на поверхность (а), разветвления (б) и формирования замкнутого кольца (в)

При скольжении краевая дислокация перемещается, все время оставаясь в своей плоскости скольжения (механизм *скольжения* дислокации). Однако возможен и иной механизм движения этой дислокации – в направлении, перпендикулярном плоскости скольжения. Такой механизм перемещения называется *переползанием* (рис. 1.13), суть его состоит в том, что дислокация перемещается вверх или вниз относительно исходной плоскости скольжения благодаря диффузионной миграции точечных дефектов (вакансий, межузельных атомов) к краю экстраплоскости. Так, если от края экстраплоскости атомы переходят в междоузлия (показано стрелкой на рис. 1.13, а), то она будет укорачиваться и, следовательно, краевая дислокация перейдет из исходной плоскости скольжения 1 в вышерасположенную параллельную плоскость скольжения 2.

В отличие от скольжения (или консервативного движения), не связанного с переносом массы, переползание является неконсервативным перемещением и сопровождается переносом массы. Интенсивность переползания

в сильной мере определяется температурными условиями вследствие диффузионного перемещения атомов и вакансий, а также в немалой степени зависит от концентрации точечных дефектов, стимулирующих процесс диффузии.

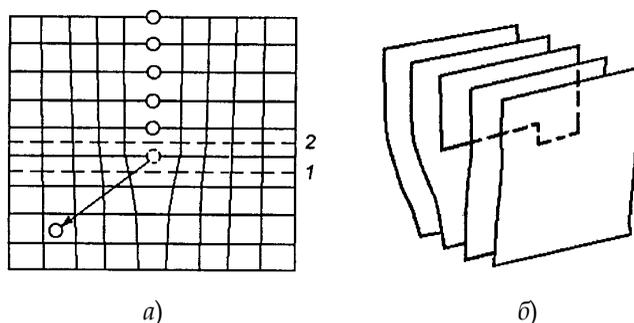


Рис. 1.13. Перемещение краевой дислокации переползанием: *a* – положение плоскости скольжения краевой дислокации исходное (1) и после переползания вверх; *б* – образование порога при переползании краевой дислокации

Чаще всего происходит переползание в новую плоскость скольжения не всей дислокации, а лишь ее части с образованием на ней ступеньки, называемой *порогом* (рис. 1.13, б). Фактически переползание состоит в зарождении порогов и их последующем продвижении вдоль линии дислокации.

Перемещаясь через весь кристалл под действием однонаправленного напряжения, разные по типу дислокации (краевая и винтовая) дадут абсолютно одинаковый конечный результат – дискретный сдвиг на величину межатомного расстояния (рис. 1.14).

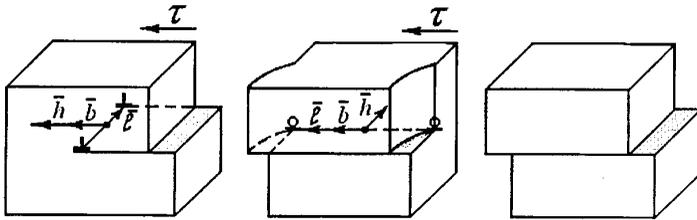


Рис. 1.14. Схема дискретного сдвига краевой (*a*) и винтовой (*б*) дислокации на величину межатомного расстояния (*б*)

Движение дислокаций в кристалле является в определенном смысле избирательным и оно наиболее легко идет по плоскостям и направлениям плотнейшей упаковки. Так под действием внешних нагрузок атомы экстраплоскости *A* краевой дислокации получают некоторое смещение на расстояние, не превышающее межатомное (рис. 1.15, *a*). Вследствие этого смещенная экстраплоскость *A* будет упруго взаимодействовать с атомами нижней части соседней полной плоскости *BC* (рис. 1.15, *б*) и при этом разрушится межатомная связь на участке *BC*. В результате возникнет новая полная плоскость *BC* (рис. 1.15, *в*), а функции экстраплоскости передаются верхнему ряду атомов соседней, бывшей полной плоскости *BC*. Тем самым краевая дислокация перемещается на одно межатомное расстояние. На следующем этапе (в условиях непрерывного воздействия внешней нагрузки) будут разрываться связи *DE* (рис. 1.15, *в*) и так далее. Происходит поочередное, эстафетное перемещение атомов на величину, меньшую межатомной, в результате чего дислокация

скользит через весь кристалл на большие расстояния. Многократное повторение этого процесса приводит к тому, что дислокация выходит на поверхность кристалла и верхняя его часть сдвигается относительно нижней – возникает ступенька (рис. 1.14, б).

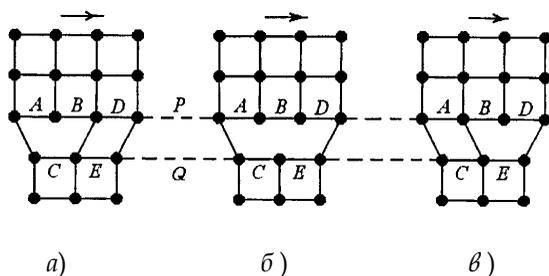


Рис. 1. 15. Последовательность разрыва и восстановления межатомных связей при движении краевой дислокации

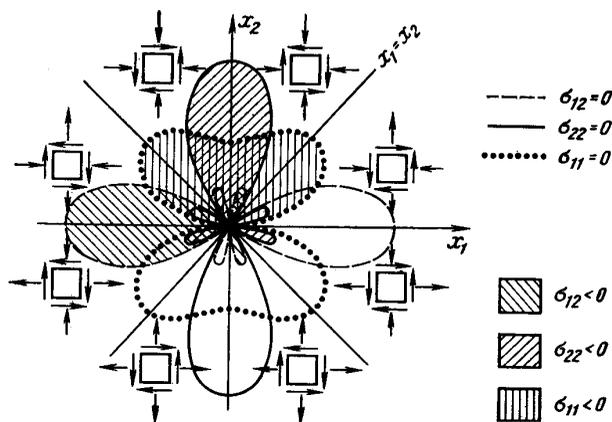


Рис. 1.16. Линии одинакового уровня напряжений  $\sigma_{ij}$  вокруг краевой дислокации

Напряжения вокруг и краевых (рис. 1.16), и винтовых дислокаций изменяются обратно пропорционально расстоянию от их центра, то есть убывают гораздо медленнее, чем напряжения, возникающие от точечного дефекта и изменяющиеся обратно пропорционально третьей степени расстояния от него. Вследствие этого *поле напряжений от дислокаций – дальнедействующее*, тогда как от точечного дефекта – *близкодействующее*.



Рис. 1.17. Линии дислокаций: *a* – скопление дислокаций в слабодеформированной аустенитной нержавеющей стали  $\times 22\ 000$ ; *б* – дислокации и линии скольжения в нержавеющей стали после растяжения  $\times 40\ 000$ ; *в* – сетка дислокаций в нержавеющей стали после растяжения  $\times 30\ 000$

На рис. 1.17 приведены некоторые типичные примеры дислокационной структуры, выявленные при просвечивании тонкой фольги в электронном микроскопе. Методом просвечивания металлической фольги изучают

форму линий дислокаций, определяют количественные характеристики дислокационной структуры, включая *плотность дислокаций* (концентрацию), которая является важной их характеристикой и представляет собой сумму длин всех дислокаций, приходящуюся на единицу объема кристалла.

Образование дислокаций обусловлено различными причинами. В противоположность образованию точечных дефектов энергия дислокаций составляет несколько электронвольт на один атом, и поэтому никакая термическая активация не может быть причиной образования дислокаций.

Как правило, большое число дислокаций в металле содержится после кристаллизации. При кристаллизации металла происходит срастание отдельных участков образующихся кристаллов со смещением их кристаллографических осей и образованием взаимно разориентированных блоков (субзерен), на границе между которыми возникают дислокации. Известно также, что кристаллы зарождаются на готовой подложке, которой служат стенки изложницы (кристаллизатора) и мельчайшие твердые частицы, взвешенные в расплаве. На поверхности таких подложек имеются готовые ступеньки – «двухмерного» зародыша, к которым присоединяются атомы кристаллизующегося расплава. Присоединение атомов к «двухмерной» ступеньке приводит к ее вращению, а поскольку атомы откладываются на винтовую поверхность, то ступенька все время продолжает существовать, облегчая тем самым присоединение атомов к кристаллу и его рост. Таким образом, из подложки как бы «прорастает» в образующийся кристалл винтовая дислокация. Поэтому даже самые совершенные

кристалл, которые удается выращивать, тем не менее не могут не содержать, по меньшей мере, винтовую дислокацию.

Возникновение дислокаций может инициироваться термическими напряжениями, возникающими в металле из-за температурного градиента, и упругими напряжениями, появляющимися в металле вследствие несоответствия кристаллических решеток подложки и растущего кристалла, наличия фаз, сегрегации примесей, пластической деформации, разных «случайностей» роста кристаллов (изгиба «нежных» ветвей дендритов из-за конвекции кристаллизующегося расплава, в частности) и действия других факторов. Каждая система стремится к минимуму своей энергии, и образование дислокаций, сопровождающееся повышением энергии, в итоге компенсируется снижением энергии упругой деформации кристалла.

Дислокации, таким образом, могут возникать не только непосредственно у фронта кристаллизации, но и в полностью затвердевшем металле в непосредственной близости от фронта кристаллизации и вдали от него. Считается, что основным здесь является вакансионный механизм образования дислокаций: равновесная концентрация вакансий с понижением температуры от температуры кристаллизации резко снижается, а при ускоренном охлаждении создается сильное пересыщение кристаллов вакансиями. Избыточные вакансии концентрируются в параллельные плоскости плотнейшей упаковки диски толщиной в один, два или три слоя вакансий (рис. 1.18, *a*). Когда диаметр вакансионного диска превышает некоторую критическую величину, то под действием сил межатомного

притяжения его стороны сближаются, диск сплющивается и происходит его захлопывание с образованием дислокаций 1 и 2 (рис. 1.18, б).

Наиболее важным способом размножения дислокаций в процессе пластического деформирования является механизм Франка-Рида, позволяющий генерировать большое количество замкнутых петель дислокаций (рис. 1.19).

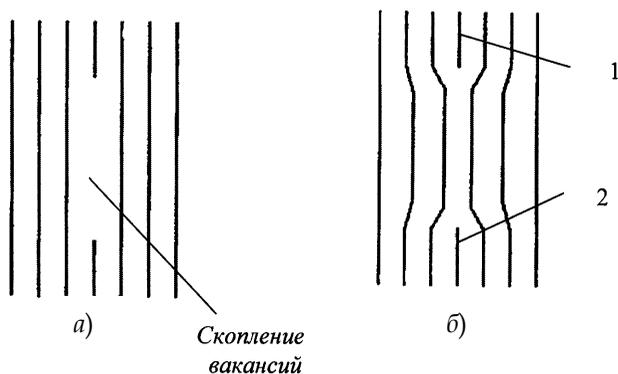


Рис. 1.18. Схема образования дислокаций 1 и 2 при захлопывании вакансионного диска

Приложенное напряжение вызывает нормальную к дислокации силу и выгибает первоначально прямую дислокацию АВ. Если кривизна дислокационной линии минимальна (на рис. 1.19 позиция 2), то дислокация становится неустойчивой, что приводит к росту дислокационной петли

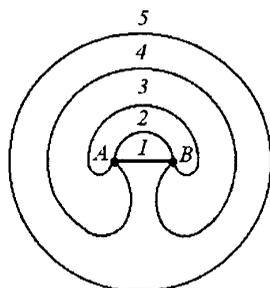


Рис. 1.19. Схема действия источника Франка-Рида

(позиции 3 и 4), вызывая ее сдвиг. Наконец, обе части зоны сдвига соединяются, образуя замкнутую петлю дислокации (позиция 5), а дислокационный отрезок АВ восстанавливает свое первоначальное положение и становится подготовленным для генерации новой петли дислокации.

Имеют место и более сложные случаи, например: размножение дислокаций путем множественного поперечного скольжения и расщепления (на частичные дислокации, в том числе с образованием двойникующих дислокаций), встречаются пространственные и спиральные источники Франка-Рида.

### *1.3.3. Поверхностные дефекты*

Поверхностные дефекты малы только в одном измерении и представляют собой поверхности раздела между отдельными зернами или их блоками (субзернами) поликристаллического металла.

Каждое зерно состоит из отдельных блоков или субзерен, образующих так называемую мозаичную структуру или субструктуру (рис. 1.20). Зерна металла разориентированы друг относительно друга на величину, достигающую от нескольких долей градуса (малоугловые границы, рис. 1.21, а) до нескольких градусов или нескольких их десятков (высокоугловые границы, рис. 1.21, б). Блоки или субзерна имеют размеры на три-четыре порядка меньше размеров кристаллитов ( $10^{-6} \div 10^{-4}$  см), их решетка почти идеальная, если не учитывать точечных несовершенств. Размеры блоков или субзерен оказывают большое влияние на свойства металлов.

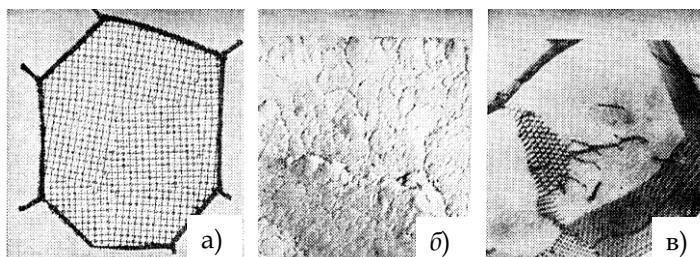


Рис. 1.20 – Блочная (мозаичная) структура зерна:  
*a* – схема зерна и блочной структуры; *б* – реальная структура металла ( $\times 20\ 000$ ); *в* – дислокационная структура границ блоков ниобия ( $\times 44\ 000$ )

Границы между отдельными кристаллитами (зернами) представляют собой переходную область шириной 5–10 межатомных расстояний, в которой решетка одного кристалла, имеющего определенную кристаллографическую ориентацию, переходит в решетку другого кристалла, имеющего другую кристаллографическую ориентацию (рис. 1.21). В связи с этим на границе зерен атомы расположены менее правильно, чем в объеме зерна. Кроме того, по границам зерен в технических конструкционных металлах концентрируются примеси, что еще более нарушает правильный порядок расположения атомов. Несколько меньшие нарушения наблюдаются на границах блоков или субзерен.

Границы блоков, а также малоугловые границы зерен образованы дислокациями (рис. 1.20, *a*). С увеличением угла разориентировки блоков или субзерен и уменьшения их величины плотность дислокаций в металле увеличивается. Вследствие того что в реальном поликристаллическом металле

протяженность границ блоков и зерен очень велика, количество дислокаций в таком металле огромно ( $10^4 \div 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ). Атомы на границах зерен, блоков или субзерен имеют повышенную потенциальную энергию.

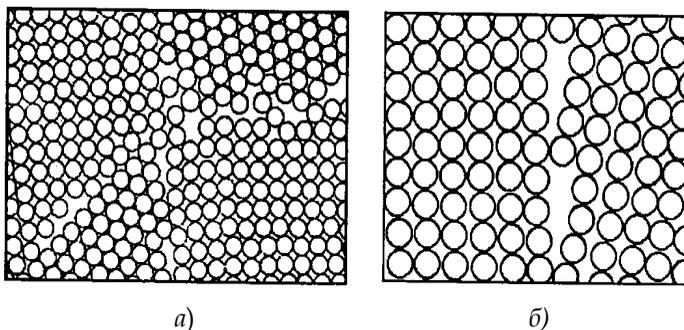


Рис. 1.21. Границы зерен:

*a* – модель малоугловой границы; *б* – модель высокоугловой

#### 1.3.4. Объемные дефекты

Объемными дефектами являются такие, которые имеют размеры одного порядка величин во всех трех измерениях (от нескольких микрометров до 1 мм и более). Обычно к ним относят макроскопические нарушения сплошности металла – трещины (силовые и геометрические), полости (технологические и структурные), поры (сферические, правильные и неправильные многогранники, эллипсоиды), включения с другой кристаллической структурой (выделения избыточных фаз) или микрообъемы аморфных фаз.

Объемные дефекты часто возникают как результат постепенной эволюции точечных или линейных несовершенств (дислокаций). В своем развитии они проходят последовательные стадии преобразования от малых (формально

микроскопических) размеров, соизмеримых с атомными масштабами, до макроскопических размеров. Простейшим примером трещины является полость в результате слияния нескольких краевых дислокаций. Ядро такой объединенной дислокации, называемой сверхдислокацией, становится зародышем клиновидной формы.

#### 1.4. Полиморфные модификации металлов

Некоторые металлы в твердом состоянии при различных температурах могут иметь либо различное строение кристаллической решетки, либо различные параметры при одинаковой форме решетки. Такие изменения кристаллической решетки приводят к скачкообразным изменениям физико-химических свойств металла (удельного объема, теплоемкости, тепло- и электропроводности, магнитных, механических, химических свойств и т.д.) и называются *полиморфными превращениями*. Различные полиморфные состояния металла или сплава называют модификациями. Способность металла существовать в различных модификациях называется *полиморфизмом*.

Полиморфные превращения встречаются у чистых металлов (к ним применяют термин *аллотропические превращения*), а также в твердых растворах и химических соединениях (например, мартенситные реакции).

Полиморфную модификацию, устойчивую при более низкой температуре, для большинства металлов принято обозначать буквой  $\alpha$ , при более высокой  $\beta$ , затем  $\gamma$ ,  $\delta$  и т.д.

Известны полиморфные превращения для металлов:  $\text{Co}_\alpha \leftrightarrow \text{Co}_\beta$ ,  $\text{Ti}_\alpha \leftrightarrow \text{Ti}_\beta$ ,  $\text{Fe}_\alpha \leftrightarrow \text{Fe}_\beta \leftrightarrow \text{Fe}_\gamma \leftrightarrow \text{Fe}_\delta$ ,  $\text{Mn}_\alpha \leftrightarrow \text{Mn}_\beta \leftrightarrow \text{Mn}_\gamma \leftrightarrow \text{Mn}_\delta$ ,  $\text{Zn}_\alpha \leftrightarrow \text{Zn}_\beta \leftrightarrow \text{Zn}_\gamma \leftrightarrow \text{Zn}_\delta$ ,  $\text{Ni}_\alpha \leftrightarrow \text{Ni}_\beta$ ,  $\text{Sn}_\alpha \leftrightarrow \text{Sn}_\beta \leftrightarrow \text{Sn}_\gamma$ , а также для Ca, Li, Na, Cs, Sr, Te, Zr, V, большого числа редкоземельных металлов и др. Плутоний насчитывает шесть кристаллических форм –  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\delta'$  и  $\epsilon$ .

Полиморфное превращение происходит в том случае, когда при данной температуре металл может существовать с меньшим запасом свободной энергии и, соответственно, с иной кристаллической решеткой или иными параметрами при одинаковой форме решетки.

Из рис. 1.22 видно, что в интервале температур 911–1392 °С устойчивой является модификация  $\text{Fe}_\gamma$  ( $\gamma$ -железо) с ГЦК кристаллической структурой (с длиной ребра куба  $a = 3,63 \times 10^{-8}$  см), имеющей меньшую свободную энергию, чем модификация  $\text{Fe}_\alpha$  ( $\alpha$ -железо) с ОЦК кристаллической структурой (с длиной ребра куба  $a = 2,87 \times 10^{-8}$  см).

При температурах выше 1392 °С устойчиво  $\delta$ -железо ( $\text{Fe}_\delta$ ) с ОЦК кристаллической структурой, а ниже 911 °С вплоть до 768 °С устойчиво  $\beta$ -железо ( $\text{Fe}_\beta$ ) также с ОЦК кристаллической структурой, так как его свободная энергия для таких температур меньше, чем у  $\gamma$ -железа ( $\text{Fe}_\gamma$ ). Температуре 911 °С соответствует превращение  $\gamma$ -железа ( $\text{Fe}_\gamma$ ) в немагнитное  $\beta$ -железо ( $\text{Fe}_\beta$ ). При температуре 768 °С происходят изменения во внешних электронных оболочках атомов, вследствие чего  $\beta$ -железо ( $\text{Fe}_\beta$ ) трансформируется в  $\alpha$ -железо ( $\text{Fe}_\alpha$ ), которое приобретает магнитные свойства.

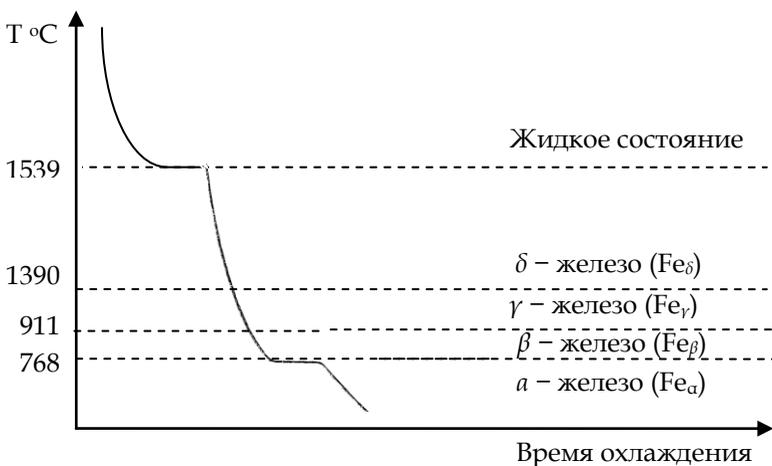


Рис. 1. 22. Кривая охлаждения железа

Стабильность полиморфных модификаций при определенной температуре и давлении определяется значением термодинамического потенциала (свободной энергии):

$$G = H - ST,$$

где  $H$  – энтальпия (общий запас внутренней энергии, теплосодержание),  $S$  – энтропия (емкость связанной энергии в кал/(град·моль)),  $T$  – температура.

Более стабильной при фиксированной температуре будет полиморфная модификация, имеющая меньшее алгебраическое значение термодинамического потенциала  $G$ , что может быть достигнуто либо за счет малой энтальпии  $H$ , либо большой энтропии. Вследствие меньшей энтальпии ГЦК и ППУ кристаллические структуры устойчивы при низких температурах, а более «рыхлая» ОЦК кристаллическая структура устойчива при повышенных температурах (табл.). Стабильность ОЦК решетки в железе и при низких температурах связывают с возрастанием электронной составляющей энтропии.

Таблица

## Кристаллическая структура полиморфных металлов

| Металл   | Кристаллическая структура | Интервал температур данной модификации, °С |
|----------|---------------------------|--|
| Титан    | ГПУ                       | До 882                                     |
|          | ОЦК                       | 882–1668                                   |
| Цирконий | ГПУ                       | До 862                                     |
|          | ОЦК                       | 862–1852                                   |
| Железо   | ОЦК                       | До 911                                     |
|          | ГПУ                       | 911–1392                                   |
|          | ОЦК                       | 1392–1539                                  |

При полиморфном превращении кристаллиты (зерна) новой полиморфной формы и структуры растут в результате неупорядоченных переходов атомов через границу фаз, представляющих собой обособленную часть металла или сплава, имеющую одинаковый состав, строение и свойства. Отрываясь от решетки исходной фазы (например,  $\beta$ ), атомы поодиночке или группами присоединяются к решетке новой фазы (в частности,  $\alpha$ ), и, как следствие этого, граница зерна  $\alpha$  передвигается в сторону зерна  $\beta$ , «поедая» исходную фазу  $\beta$ .

Удобным местом для зарождения новой фазы считаются границы зерен или зоны с повышенным уровнем свободной энергии.

Причиной зарождения новой фазы на границах зерен является воздействие ряда следующих факторов:

– влияние термодинамического стимула: при образовании зародыша новой фазы исчезает некоторая часть границы зерна, и высвобождающаяся при этом избыточ-

ная энергия межзеренной поверхности раздела исходной (матричной) фазы идет на образование новой фазы;

– влияние концентрационного фактора: сосредоточение на границах зерен поверхностно-активных элементов (примесей) облегчает процесс зарождения и образования новой фазы;

– влияние кинетического фактора: для зарождения и роста новой фазы требуется диффузия, и вклад этого процесса весьма существенен и имеет решающее значение для преимущественного зарождения частиц новой фазы.

По ряду причин сказывается стимулирующее влияние структурного фактора – процесс зародышеобразования новой модификации облегчается на дефектах упаковки, представляющих собой локализованные нарушения пространственной закономерности расположения атомных слоев, то есть прослойки с иной кристаллической структурой, чем исходная (матричная) фаза. Если возникающая новая фаза имеет кристаллическую решетку того же типа, что и дефект упаковки, то последний служит готовым зародышевым центром новой фазы. Проявляется также действие концентрационного фактора – химические неоднородности, ликвации из-за различающейся растворимости легирующего компонента на дефектах упаковки (атмосферы Сузуки) представляют собой готовые концентрационные флуктуации, необходимые для зарождения частиц новой фазы по диффузионному механизму.

Аналогично проявлению действия концентрационного фактора – готовые флуктуации по составу неоднородностей из атомов растворенного компонента сплава и примесных атомов (атмосферы Коттрелла) вблизи дисло-

каций – линейных дефектов кристаллической решетки исходной (матричной) фазы. Необходимо учитывать также вклад кинетического фактора, обусловленного тем, что диффузионная подвижность примесных атомов вдоль дислокационных трубок заметно выше, чем в самой исходной (матричной) фазе. Влияние дислокаций на процесс зарождения частиц новой фазы, как и границ зерен, наиболее полно проявляется при пониженных температурах.

Контрольные вопросы по главе 1:

1. Как называется вещество, в состав которого входят два или несколько компонентов?
2. Как называется явление, при котором вещества, состоящие из одного и того же элемента, имеют разные свойства?
3. Назовите предельное содержание углерода в стали.
4. Назовите предельное содержание углерода в чугуне.
5. Виды твердых растворов, примеры.
6. Что такое кристаллическая решётка? Типы кристаллических решёток в металлах?
7. Что такое вакансия и как она образуется?
8. Какие существуют виды дислокаций?
9. Какие материалы называются хрупкими?

## Глава 2

### НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

---

Основа неметаллических материалов – природные (натуральный каучук, белки, целлюлоза) и главным образом синтетические полимеры, производство которых возрастает с каждым годом. Ряд синтетических полимеров получают путем химической модификации природных полимеров, и получаемые при этом вещества называются искусственными полимерами. Многие синтетические полимеры не имеют аналогов среди природных. Наиболее известные синтетические полимеры :

Полиметилметакрилат  $[\sim\text{CH}_2\text{-C}(\text{CH}_3)(\text{COOCH}_3\text{-})_n$ ;

Найлон  $[-\text{CO}\text{-(CH}_2\text{)}_4\text{-CONH}\text{-(CH}_2\text{)}_6\text{-NH-}]_n$ .

Производство неметаллических материалов из дешевых и массовых источников сырья, продуктов химической переработки нефти, природного газа и каменного угля, высокопроизводительные методы изготовления деталей из неметаллических материалов наряду с достоинствами их технико-технологических характеристик обеспечивают значительную экономическую эффективность автотранспортного машиностроения.

## **2.1. ПЛАСТМАССЫ – НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

### **2.1.1. Компоненты и классификация пластмасс**

Пластмассы представляют собой материалы, основным компонентом которых является синтетический или природный полимер. К другим компонентам пластмасс относятся вспомогательные вещества. Полимеры – высокомолекулярные соединения, состоящие из огромного количества молекул веществ (звеньев), называемых мономерами.

ми, которые вследствие обладания способностью при определенных условиях последовательно соединяться друг с другом образуют длинные цепи с линейной (а), разветвленной (б), лестничной (в), густосетчатой (г), редкосетчатой (д) и паркетной (е) структурами связи (рис. 2.1). В результате соединения (химического сложения) мономеров друг с другом получают макромолекулы полимера.

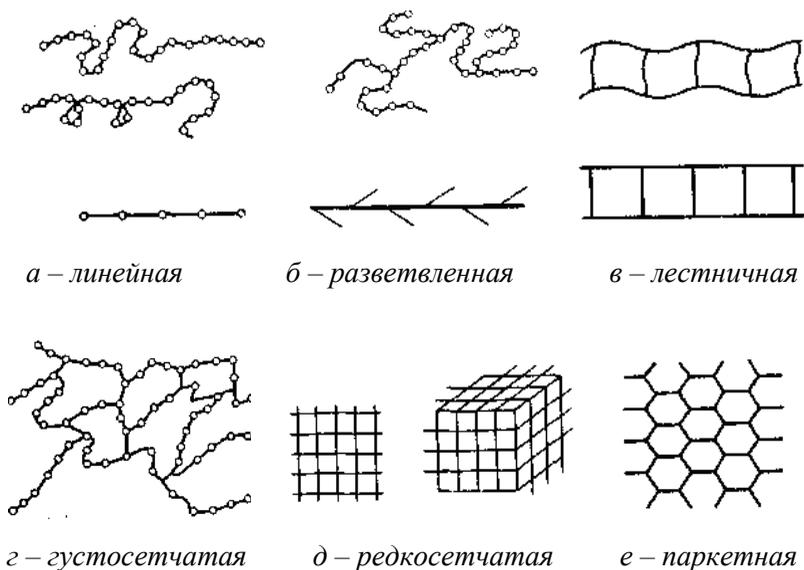


Рис. 2.1. Формы макромолекул полимеров

*Линейные* макромолекулы полимера представляют собой длинные зигзагообразные или закрученные в спираль цепочки (рис. 2.1, а).

*Разветвленные* макромолекулы (рис. 2.1, б), являясь также линейными, отличаются наличием боковых ответвлений, что препятствует их плотной упаковке (полиизобутилен).

Макромолекула *лестничного* полимера (рис. 2.1, *в*) состоит из двух цепей, соединенных химическими связями. Лестничные полимеры имеют более жесткую основную цепь и обладают повышенной теплостойкостью, большей жесткостью, они нерастворимы в стандартных органических растворителях (кремнийорганические полимеры).

Пространственные полимеры образуются при соединении («сшивке») макромолекул между собой в поперечном направлении прочными химическими связями непосредственно или через химические элементы или радикалы. В результате образуется сетчатая структура с различной плотностью сетки.

*Редкосетчатые* (сетчатые) полимеры (см. рис. 2.1, *д*) теряют способность растворяться и плавиться, они обладают упругостью (мягкие резины).

*Густосетчатые* (пространственные) полимеры (см. рис. 2.1, *з*) отличаются твердостью, повышенной теплостойкостью, нерастворимостью. Пространственные полимеры лежат в основе конструкционных неметаллических материалов.

К сетчатым полимерам относятся также пластинчатые (*паркетные*) полимеры (рис. 2.1, *е*).

В зависимости от *взаимной ориентации макромолекул* полимеры могут находиться в аморфном или кристаллическом состояниях. В *аморфном* состоянии полимер имеет упорядоченное строение только в пределах участков, размеры которых соизмеримы с размерами звеньев цепи макромолекул, т.е. в аморфных полимерах соблюдается ближний порядок.

В *кристаллических* полимерах соблюдается не только ближний, но и дальний порядок на расстояниях, во много раз превышающих размеры звеньев цепи макромолекул полимера.

В структуре реальных полимеров практически всегда содержатся как аморфная, так и кристаллическая части. По преобладанию той или иной структуры полимеры делят на аморфные и кристаллические.

Характерными элементами надмолекулярной структуры полимеров являются *глобула* (рис. 2.2, а) для аморфных структур и *пачка* (рис. 2.2, б) для кристаллических.

Глобула представляет собой свернутые в клубок цепи макромолекул полимера или их агрегатов. Пачка состоит из параллельно расположенных цепей, причем суммарная длина пачки, как правило, превышает длину отдельных цепей макромолекул полимера.

Аморфное состояние для большинства полимеров термодинамически более устойчиво, что определяется энергетически более выгодной формой надмолекулярного образования аморфного полимера: глобула обладает минимумом свободной энергии.

Выделяющаяся в процессе полимеризации кристаллизующегося полимера пачка макромолекул характеризуется анизотропией, поэтому энергетически выгодным является ее расположение параллельно поверхности кристаллизации. Взаимосогласованная ориентация макромолекул относительно поверхности кристаллизующихся полимеров определяет все многообразие надмолекулярных структур кристаллизующихся полимеров. Термодинамически наиболее устойчивой формой надмолекулярного

образования является *сферолит* (рис. 2.2, *в*), сформированный тангенциально расположенными пачками макромолекул. Сферолитные структуры типичны для большинства кристаллизующихся полимеров.

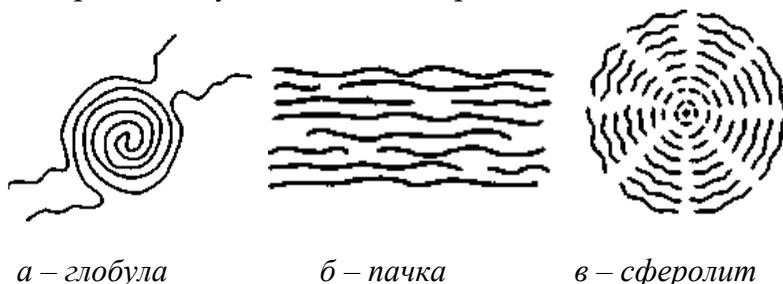


Рис. 2.2. Элементы надмолекулярной структуры полимеров

На поверхностях раздела сферолитов условия контактного взаимодействия макромолекул различны. Экспериментально установлено, что прочность торцового контакта макромолекул более чем на порядок превышает прочность бокового контакта. Это открывает возможность управления прочностью кристаллизующихся полимеров.

Примером практической реализации влияния надмолекулярной структуры на прочность может служить ориентационное упрочнение полимеров. В процессе вытяжки полимеров при повышенных температурах макромолекулы ориентируются параллельно направлению приложения нагрузки. Полученная структура полимера затем фиксируется путем снижения температуры под силовой нагрузкой. Физико-механические свойства полимера в направлении ориентации увеличиваются примерно в 5 раз, а в перпендикулярном направлении уменьшаются до 2 раз по сравнению с исходным значением. Анизотро-

пия прочности объясняется изменением соотношения торцового и бокового контактов макромолекул полимера.

Ориентационное упрочнение полимеров наиболее широко применяется при получении искусственных волокон и пленок.

По отношению к электрическому полю (*по полярности*) полимеры подразделяются на *полярные* и *неполярные*. Полярность определяется наличием в составе полимера диполей – разобщенных центров положительных и отрицательных зарядов.

В *полярных* полимерах имеются полярные связи (группировки  $-Cl$ ,  $-F$ ,  $-OH$ ) и несимметрия в их структуре: центр тяжести электронов сдвинут в сторону более электроотрицательного атома. Центры тяжести разноименных зарядов не совпадают.

Полярные полимеры имеют повышенную прочность, жесткость, но низкую морозостойкость (хрупкость уже при температуре от  $-10^{\circ}C$  до  $-20^{\circ}C$ ). Их можно сваривать током высокой частоты. Полярности полимера можно оценить по величине диэлектрической проницаемости  $E$ . У полярных полимеров  $E \geq 3,5$ .

*Неполярные* (на основе углеводородов) – высококачественные диэлектрики, обладают хорошей морозостойкостью. Дипольный момент связей атомов в неполярных полимерах взаимно компенсируется. В макромолекулах неполярных полимеров симметричное расположение групп. Центры тяжести разноименных зарядов совпадают.

Все полимеры *по отношению к нагреву* подразделяют на *термопластичные* и *терморепаративные*.

Некоторые полимеры при нагревании плавно переходят через вязкопластическое в жидкотекучее состояние. При охлаждении отмечается также плавный переход в твердое состояние. Нагревание полимера до температур ниже температуры его термической деструкции не вызывает необратимого изменения свойств материала, что позволяет многократно повторять процесс термической обработки линейных полимеров. Такие структуры макромолекул образуют класс *термопластичных полимеров*. К термопластам относятся полипропилен (PP – самый распространенный тип пластика, применяемый в автомобилестроении), поливинилхлорид (PVC), сополимеры акрилонитрила, бутадиена и стирола (ABS), полистирол (PS), поливинилацетат (PVA), полиэтилен (PE), полиметилметакрилат (оргстекло) (PMMA), полиамид (РА – используют для производства съемных автомобильных колпаков, различных втулок и вкладышей, хомутов, языков замка дверей и защелок), поликарбонат (PC), полиоксиметилен (POM) и др.

Другие полимеры под действием теплоты, минуя жидкое состояние, необратимо переходят в твердое состояние и не могут использоваться повторно. Такое поведение полимеров при нагревании называют терморезистивным, а сами полимеры относят к классу *терморезистивных полимеров* (реактопластов). Эти материалы являются достаточно термостойкими (таблица 2.1), поэтому их используют, например, для производства деталей картера в подкапотном пространстве. Из армированных (например стекловолокном) реактопластов производят крупногабаритные наружные кузовные детали (капоты, крылья, крышки

багажников). К группе реактопластов относятся материалы на основе фенолформальдегидных (PF), карбамидоформальдегидных (UF), эпоксидных (EP) и полиэфирных смол. ПА (Polyamide (Nylon)) – умеренно жесткий реактопласт, используемый для изготовления внешних деталей отделки автомобильного кузова, декоративных колпаков колес, лючков бензобака, радиаторных бачков, корпуса фар и боковых зеркал, пластиковых частей двигателя.

*По природе* все полимеры можно разделить на две группы – *природные* и *синтетические*.

Полимеры (*природные*) – встречающиеся в природе органические вещества растительного (хлопок, шелк, натуральный каучук и др.) и животного (кожа, шерсть и др.) происхождения, а также минеральные вещества (слюда, асбест, естественный графит, природный алмаз и др.).

*Синтетические* полимеры получают из простых веществ путем химического синтеза. Основным преимуществом синтетических полимеров перед природными являются неограниченные запасы исходного сырья и широкие возможности синтеза полимеров с заранее заданными свойствами. Исходным сырьем для получения синтетических полимеров являются продукты химической переработки нефти, природного газа и каменного угля. Получаемые при этом низкомолекулярные вещества называют мономерами. Их перерабатывают в полимеры в процессе дальнейшей химической обработки.

Таблица 2.1

Свойства термореактивных пластмасс

| Материал        | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Рабочая температура, °С |     | $\sigma_v$ , МПа при растяжении | Модуль упругости, МПа | $\delta$ , % на разрыв | Ударная вязкость, КДж/м <sup>2</sup> |
|-----------------|------------------------------|-------------------------|-----|---------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|
|                 |                              | min                     | max |                                 |                       |                        |                                      |
| Полиэтилен ПЭВД | 913–29                       | –70                     | 105 | 10–17                           | 120–260               | 15–20                  | Не ломается                          |
| Полиэтилен ПЭНД | 949–53                       | –70                     | 125 | 18–35                           | 650–750               | 10–12                  | 2–150                                |
| Полистирол      | 1050–1080                    | –20                     | 90  | 35                              | 2700                  | 1,5                    | 16–20                                |
| Фторопласт      | 215–2240                     | –269                    | 250 | 14–35                           | 470–850               | 250–500                | 10–100                               |
| Поливинилхлорид | 1400                         | –40                     | 80  | 40–120                          | 2600–3000             | 5–100                  | 75–80                                |
| Полиметилакрил  | 1200                         | –60                     | 60  | 63–100                          | 2900–4160             | 2,5–20                 | 8–18                                 |

Все синтетические полимеры разделяют на полимеризационные и поликонденсационные.

При реакции полимеризации большое количество одинаковых молекул простых веществ (мономеров) соединяются в одну сложную молекулу (полимер) без выделения побочных продуктов и без изменения первоначального состава. Полимеризацией получают такие синтетические полимеры, как полиэтилен, поливинилхлорид, полипропилен, полиметилметакрилат (оргстекло) и др. При реакции поликонденсации из нескольких простых соединений образуется полимер, состав которого отличается от состава исходных продуктов, и при этом выделяются побочные вещества (вода, аммиак, углекислота и др.). Поли-

конденсацией получают фенолоформальдегидные, карбамидные, полиамидные и другие синтетические полимеры.

Полимеры являются связующими веществами, определяющими основные свойства пластмасс. Введение добавок, в качестве которых используются наполнители, пластификаторы, стабилизаторы, отвердители, красители, смазывающие вещества, антипирены и др., придает пластмассам специальные свойства за счет воздействия на межмолекулярные силы полимеров. Вследствие этого различают простые и сложные пластмассы. К простым относятся пластмассы, состоящие только из полимера, а к сложным – содержащие, кроме полимера, различные добавки.

Для улучшения механических свойств, уменьшения усадки и стоимости пластмасс используют добавки-наполнители в количестве 40–90% (по массе), т.е. у большинства пластмасс существенная часть объема приходится на долю наполнителей. Номенклатура наполнителей для пластмасс разнообразна. Это порошкообразные (мел, древесная мука, тальк, кварцевая мука, графит, сажа и т.п.), волокнистые (асбестовые, древесные, стеклянные, хлопчатобумажные волокна) и слоистые (древесный шпон, бумага, стеклоткань) материалы. Слоистые и волокнистые наполнители резко повышают прочность пластмасс на растяжение и изгиб. Сажа или графит, вводимые в пластмассу, придают ей свойство электропроводности, преимущественно минеральные наполнители увеличивают теплостойкость и атмосферостойкость пластмасс и снижают их горючесть наряду с наполнителями антипиренами. К числу наполнителей можно отнести и воздушные поры, которые делают газонаполненные пластмассы (пено- и поропласты)

высокоэффективными теплоизоляторами. Наполнители, уменьшая содержание полимера в пластмассах, значительно снижают их стоимость.

Для улучшения текучести и пластических свойств пластмасс используют добавки-пластификаторы. В качестве пластификаторов применяют камфору, олеиновую кислоту, эфиры, дибутилфталат, трикрезилфосфат и т.п. Добавки-стабилизаторы (антиоксиданты) способствуют длительному сохранению пластмассами своих первоначальных свойств, например долговечности. Пластмассы под действием кислорода, температуры подвергаются старению, вызывающему снижение их эластичности и повышение хрупкости. Количество стабилизаторов зависит от их эффективности и от некоторых побочных воздействий, которые они могут оказывать на свойства полимеров. Основные стабилизаторы вводят в количестве до 5%. Для придания полимеру определенного комплекса свойств используют смеси стабилизаторов. Антиоксиданты защищают полимер от разрушения под действием теплоты и кислорода, предотвращая или замедляя те окислительные процессы, которые приводят к старению полимеров. Это наиболее важная группа стабилизаторов, применяющихся для защиты почти всех полимерных материалов. Наиболее распространенный антиоксидант - 2,6-дитрет-4-метилфенол (ионол). На практике также широко применяется НЕОЗОН-Д - фенил-*b*-нафтиламин.

С целью ускорения технологического процесса изготовления деталей за счет сокращения времени отверждения пластмасс за счет образования на определенной стадии их переработки трехмерной сетки в их состав вводят

сшивающие агенты – катализаторы-отвердители в количестве до 20% (по массе). Основой этих процессов являются реакции полимеризации и поликонденсации (рис. 2.3). В качестве отвердителей преимущественно используют ангидриды кислот, амины и другие вещества (известь, окись магния), способные образовывать поперечные связи между макромолекулами полимера. Отвердители подразделяются на два класса: отверждающие на холоде и отверждающие при нагревании. К первым относятся в основном амины, ко вторым – кислоты и ангидриды кислот.

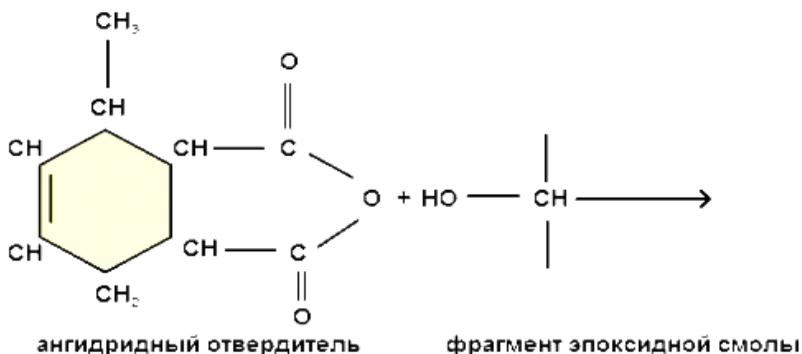


Рис. 2.3. Фрагмент необратимой реакции полимеризации эпоксидной смолы с отвердителем

В пластмассы часто вводятся в небольших количествах и другие добавки – смазывающие вещества (стеарин, воск и т.п.), облегчающие прессование и предупреждающие прилипание деталей к стенкам формы в процессе их формования, порообразователи для получения пено- и поропластов, светящиеся составы, красители (нигрозин, охра, сурик и др.), придающие пластмассам требуемую окраску, фунгициды – против разрушающего воздействия плесени и пр.

Для создания мелкокристаллической структуры с улучшенными физико-механическими свойствами в полимер вводят различные оксиды, карбиды, нитриды, соли органических кислот и другие соединения, которые играют роль искусственных центров кристаллизации. Увеличенное число центров кристаллизации в единице объема полимера приводит к тому, что крупные кристаллические образования «физически» не могут сформироваться из-за пространственных затруднений. В результате этого образуется большое число сферолитов небольших размеров однородной мелкокристаллической структуры (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Различные виды сферолитов:  
*а* – радиальный; *б* – кольцевой

Добавляют структурообразователи (регуляторы структурообразования) в количестве 0,1–1,0% от массы полимера. Большие количества добавок структурообразователей (нуклеаторов, зародышеобразователей) приводят к образованию трещин.

## 2.2. Основные области применения пластмасс в машиностроении

Виды деталей, узлов автомобилей и пригодные для их изготовления полимерные материалы:

- зубчатые и червячные колеса: полиамиды, полипропилен, пентапласты, поликарбонаты, полиформальдегид, фенопласты;
- шкивы, маховички, рукоятки, кнопки: полиамиды, аминокласты, фенопласты;
- ролики, катки, бегуны: полиамиды, поливинилхлорид, полипропилен, поликарбонаты;
- подшипники скольжения: полиамиды, полиэтилен, полипропилен, полиакрилаты, эпоксидпласты, пентапласты, поликарбонаты, полиформальдегид, фенопласты;
- направляющие станков: полиамиды, эпоксидпласты, текстолит;
- детали подшипников качения: полиамиды, поликарбонаты и др.;
- тормозные колодки, накладки: фенопласты;
- рабочие органы вентиляторов, насосов и гидромашин: полиамиды, полиэтилен, поливинилхлорид, полипропилен, пентапласты, поликарбонаты, стеклопластики;
- трубы, детали арматуры, фильтры масляных и водных систем: полиэтилен, поливинилхлорид, полипропилен, поликарбонаты, стеклопластики;
- уплотнения: полиамиды, полиэтилен, фторопласты, поливинилхлорид, полипропилен;
- кожухи, корпуса, крышки, резервуары: полиэтилен, аминокласты, поливинилхлорид, полипропилен, по-

листирол, полиакрилаты, поликарбонаты, фенопласты, стеклопластики;

- детали приборов и автоматов точной механики: полиамиды, полиэтилен, поливинилхлорид, полипропилен, пентапласты, поликарбонаты, полиформальдегид, фенопласты;

- болты, гайки, шайбы: полиамиды, полиэтилен, аминопласты, поливинилхлорид, полипропилен, пентапласты, поликарбонаты, полиформальдегид, фенопласты;

- пружины, рессоры, кулачковые механизмы, клапаны: полиамиды, поливинилхлорид, полипропилен, поликарбонаты, полиформальдегид, текстолит, стеклопластики;

- крупногабаритные элементы конструкций, емкости, лотки и др.: полиэтилен, поливинилхлорид, полистирол, стеклопластики;

- электроизоляционные детали, панели, щитки, корпуса приборов: полиамиды, полиэтилен, фторопласты, аминопласты, поливинилхлорид, полипропилен, полистирол, полиакрилаты, эпоксиласты, пентапласты, поликарбонаты, полиформальдегид, фенопласты, волокниты, текстолит, стеклопластики;

- светопропускающие оптические детали (линзы, смотровые стекла и др.): полиэтилен, аминопласты, полипропилен, полистирол, полиакрилаты, поликарбонаты.

Основные требования к пластмассам для зубчатых колес – высокая контактная прочность и сопротивление изгибу, износостойкость, демпфирующая способность, динамическая выносливость, стабильность размеров. При использовании пластмасс, удовлетворяющих этим требо-

ваниям, повышается долговечность колес, в среднем в 1,5 раза снижается уровень шума, уменьшается чувствительность передачи к наличию смазки, снижаются требования к точности изготовления колеса. Однако единичный зуб из полиамида со стандартным контуром по статической прочности уступает зубьям из улучшенной или закаленной стали соответственно в 3–5 и 7 раз. Деформация зубьев из пластмассы достигает десятых долей мм, а размеры контактной площадки становятся соизмеримыми с размером зуба. Все же благодаря новым технологическим и конструктивным решениям удалось расширить области применения зубчатых колес из пластмасс, увеличить их несущую способность, повысить кинематическую точность, износостойкость и др. Армирование колес из пластмасс металлом позволяет наиболее эффективно использовать достоинства обоих материалов.

Пластмассы все более широко используют вместо нержавеющей сталей и других материалов в волновых передачах, отличающихся компактностью и большими передаточными отношениями (например, от 64 : 1 до 320 : 1), а также для изготовления звездочек в цепных передачах.

Плоские, клиновые и зубчатые ремни из пластмасс (полиамидов, поливинилхлорида), а также из резины могут быть использованы для передачи даже значительных мощностей. В отличие от ремней из традиционных материалов, ремни из полимерных материалов можно эксплуатировать в агрессивных средах без применения натяжных роликов. Многослойные ремни шириной 10–1200 мм, армированные синтетическими волокнами, могут быть использованы для передачи мощностей до 3600 кВт

при скоростях 50–80 м/сек. Применение в ременных передачах прочных и износостойких шкивов из пластмасс, характеризующихся малой плотностью, высоким коэффициентом сцепления с ремнем, стабильностью размеров, позволяет уменьшить инерционные силы, увеличить срок службы ремней.

Применение труб из полимерных материалов вместо металлических приводит к упрощению их монтажа вследствие снижения массы, уменьшению гидравлических потерь и расхода мощности на транспортировку материалов, увеличению пропускной способности труб, повышению срока службы (особенно в агрессивных средах, в земле и воде).

Основной материал для уплотнительных прокладок, помимо высокой износо- и теплостойкости, должен обладать эластичностью, а также стойкостью в различных агрессивных средах. Для уплотнения подвижных соединений или соединений, которые подвергаются действию высоких давлений, используют обычно уплотнители из пластмасс.

Полимерные материалы применяют для фиксации резьбовых соединений, осуществляемой различными способами: использованием гаек из пластмасс, нарезку на которых создают при ввинчивании в них металлических болтов; применением шайб и вкладышей из пластмасс, а также с помощью быстроотверждающихся компаундов. Эти способы фиксации обеспечивают повышение срока службы резьбовых соединений, выполняющих одновременно функции уплотнительных элементов.

Эпоксидные и акрилатные компаунды применяют в качестве универсальных компенсаторов погрешностей при сборке узлов автомобилей. Благодаря их использованию процесс сборки сводится к установке деталей с требуемой точностью и заливке компаундом пространства между сопрягаемыми деталями. Заполняя зазоры, компаунд компенсирует все погрешности обработки и сборки деталей. Применение компенсаторов позволяет на 2–3 класса расширить допуски на изготовление поверхностей, снизить себестоимость обработки деталей, уменьшить трудоемкость их сборки. Заданная точность замыкающего звена сборочных размерных цепей может быть обеспечена за одну выверку.

В качестве конструкционных материалов полимеры имеют ограниченное применение из-за относительно низких характеристик прочности и предела текучести. Не получило большого развития улучшение конструкционных свойств термопластов путем введения армирующих наполнителей вследствие плохой смачиваемости ими поверхности большинства наполнителей, в первую очередь. Кроме того, вязкость термопластов резко возрастает при введении зернистого или дискретного волокнистого наполнителя. У реактопластов вязкость на несколько порядков ниже, чем у термопластов, что обуславливает их преимущественное использование в технологии получения композиционных материалов (КМ), как реальной возможности улучшения конструкционных свойств полимеров. Наиболее распространены матрицы из фенолформальдегидных и эпоксидных полимеров.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Что представляют собой синтетические и природные полимеры?
2. Что такое пластмассы? Их состав и назначение входящих компонентов.
3. Как классифицируются пластмассы? Опишите состав основных видов пластмасс и охарактеризуйте их.
4. Что такое термопластичные и термореактивные пластмассы?
5. Какими свойствами характеризуются термопластичные и термореактивные пластмассы?
6. Назовите виды термопластичных пластмасс.
7. Назовите виды термореактивных пластмасс.
8. В чем состоят особенности применения пластмасс в автомобилестроении?
9. Приведите конкретные области применения пластмасс в качестве конструкционного материала.

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. ON THE PROBLEM OF THE THREE-DIMENSIONAL FLOW OF METAL UPON OPEN FORGING / V.A. Belevitin, V.F. Obesnyuk, E.R. Logunova // Russian metallurgy (Metally). 2003. – № 1. – С. 21–25.
2. О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ ДИАМЕТРОВ ВАЛКОВ И ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ / Р.М. Голубчик, В.К. Воронцов, В.А. Белевитин // Сталь. 1982. – № 8. – С. 64–66.
3. К ПОСТАНОВКЕ И РЕШЕНИЮ ОБЪЕМНОЙ ЗАДАЧИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТОДАМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕХАНИКИ / В.К. Воронцов, П.И. Полухин, В.А. Белевитин, В.В. Бринза // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1976. – № 4. – С. 75–80.
4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКОЙ КАДРОВ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОННОГО ОБУЧЕНИЯ / С.А. Богатенков, Е.А. Гнатышина, В.А. Белевитин. – Челябинск, Изд-во: Южно-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2017. – 155 с.
5. Белевитин, В.А. НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ РАБОТА МАГИСТРАНТА: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЯ: учеб.-метод. пособие / В.А. Белевитин, Е.А. Гнатышина, И.Г. Черновол. Челябинск, Изд-во: Южно-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2017. – 122 с.
6. МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ: РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ И ЗАЩИТЕ: учеб.-методич. пособие / В.А. Белевитин, Е.А. Гнатышина, И.Г. Черновол. Челябинск, Изд-во: Южно-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2016. – 158 с.
7. ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ НА РУБЕЖЕ ВЕКОВ: колл. монография / Е.А. Гнатышина,

- Г.А. Герцог, А.В. Савченков, Л.П. Алексеева, Н.В. Уварина, Е.В. Гнатышина, Н.Ю. Корнеева, В.А. Белевитин. Челябинск, Изд-во: Южно-Урал. гос. пед. ун-та, 2014. – 304 с.
8. Белевитин, В.А. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ: учеб. пособие / В.А. Белевитин / Челябинск, Изд-во: Южно-Урал. гос. пед. ун-та, 2012. – 236 с.
9. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК / А.А. Минаев, В.А. Белевитин, Е.Н. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1990. – № 12. – С. 26–28.
10. БЕСКОНТАКТНЫЙ ОДНОКАНАЛЬНЫЙ ВРЕЯИМ-ПУЛЬСНЫЙ РАСХОДОМЕР ЖИДКОСТИ / А.И. Бражников, В.А. Белевитин, Е.В. Бражникова, Е.Л. Иванов // Метрология. 2004. – № 11. – С. 16.
11. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КОВАННЫХ ВАЛОВ / В.А. Белевитин, Н.И. Бражников // Сталь. 2000. – № 4. – С. 47–48.
12. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ ПОВЫШЕННОЙ ТВЕРДОСТИ ПРИ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ / А.И. Серов, Е.Н. Смирнов, В.А. Скляр, В.А. Белевитин // Обогащение руд. 2017. – № 3 (369). – С. 15–20.
13. СКВОЗНАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОДУКТА И ПРЕССОВАННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРОФИЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ТИПОВОГО РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОИЗВОДИТЕЛЯ ООО «АЛТЕК» / Е.Н. Смирнов, В.А. Скляр, М.В. Митрофанов, О.Е. Смирнов, В.А. Белевитин, А.Н. Смирнов // Металлург. 2017. – № 10. – С. 49–53.
14. Смирнов, Е.Н. Развитие подходов к исследованию на физических моделях механизмов «залечивания» дефектов

сплошности осевой зоны непрерывно-литой заготовки / Е.Н. Смирнов, В.А. Склиар, В.А. Белевитин, Р.А. Шмыгля, О.Е. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2016. – Т. 59. – № 5. – С. 322–327.

15. Smyrnov, Y.N. Physical and Computer modeling of new soft reduction Process of continuously cast blooms / Y.N. Smyrnov, V.A. Belevitin и др. // Journal of Chemical Tecnology and Metallurgy, 2015. – 50. – № 6. – P. 12–17.

16. AN ULTRASOUND METHOD FOR CONTROLLING THE QUALITY OF SHAPED FORGINGS / I.P. Belevitina, N.I. Brazhnikov, V.A. Belevitin // Metallurgist. 1996. – Т. 39. – № 10. – С. 198.

19. DEFECT HEALING IN THE AXIAL ZONE OF CONTINUOUS-CAST BILLET / Y.N. Smyrnov, V.A. Skliar, V.A. Belevitin, R.A. Shmyglya, O.Y. Smyrnov // Steel in Translation. 2016. – Т. 46. – № 5. – С. 325–328.

20. PHYSICAL AND COMPUTER MODELING OF NEW SOFT REDUCTION PROCESS OF CONTINUOUSLY CAST BLOOMS / Y.N. Smyrnov, V.A. Belevitin, V.A. Skliar и др. // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2015. – Т50. – №6. – С. 12.

21. Belevitin, V.A. SIMULATION OF THE MACROSTRUCTURE INFLUENCE OF FORGING INGOTS ON THE POTENTIAL CAPABILITIES OF OBTAINING HIGH-QUALITY FORGINGS / V.A. Belevitin, Y.N. Smyrnov, S.Y. Kovalenko, A.V. Suvorov // Metallurgical and Mining Industry. 2016. № 7. С. 18–23.

22. CHEMICAL COMPOSITION OF THE CONDITIONED AND NONCONDITIONED NIGNEUVELYSKAYAS CLAY CHELYABINSK REGION / A.A. Sherbakov, M.S. Klepikov, N.F. Solodkii, A.S. Serikov, V.V. Rukavishnikov, V.M.

Zhestkov, Belevitin V.A. // Башкирский химический журнал. 2011. – Т. 18. – № 4. – С. 236–239.

23. Белевитин, В.А. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ: учеб. пособие / В.А. Белевитин. Челябинск, Челяб. гос. пед. ун-т. 2012.

24. Белевитин, В.А. ОПЕРАЦИОННО-ЗАЧЕТНЫЕ РАБОТЫ ПО ОБЩЕСЛЕСАРНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКЕ: сб-к лаб. работ / В.А. Белевитин, А.В. Суворов, Е.П. Меркулов. Челябинск, Челяб. гос. пед. ун-т. 2015.

26. Воронцов, В.К. К ПОСТАНОВКЕ И РЕШЕНИЮ ОБЪЕМНОЙ ЗАДАЧИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТОДАМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕХАНИКИ / В.К. Воронцов, П.И. Полухин, В.А. Белевитин, В.В. Бринза // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1976. – № 4. – С. 75–80.

27. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОЛИТА Н.И. БРАЖНИКОВА / А.И. Бражников, В.А. Белевитин, Ф.И. Бражников и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005. – № 3. – С. 54–56.

28. О МОДЕЛИРОВАНИИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ РАСКАТОВ С НЕРАВНОМЕРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО СЕЧЕНИЮ НА ПЛАСТИЛИНОВЫХ МОДЕЛЯХ / А.А. Минаев, Е.Н. Смирнов, В.А. Белевитин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1992. – № 4. – С. 57–59.

29. АКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СВОЙСТВ УПРУГИХ И ТВЕРДЫХ СРЕД В ТЕХНИКЕ: монография / Н.И. Бражников, В.А. Белевитин, Е.В. Бражникова. Челябинск, Челяб. гос. пед. ун-т. 2012.2011.

30. Воронцов, В.К. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ ПРОКАТЕ КВАДРАТНОЙ ПОЛОСЫ В

- ОВАЛЬНОМ КАЛИБРЕ / В.К. Воронцов, Ю.С. Атеф, В.В. Бринза, В.А. Белевитин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1977. – № 5. – С. 101-105.
31. ULTRASONIC CONTROL OF THE FLUID-FLOW VELOCITY WITHOUT N. I. BRAZHNIKOV'S UNDOCKING OF A PIPELINE / A.I. Brazhnikov, V.A. Belevitin, F.I. Brazhnikov, E.L. Ivanov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2006. – Т. 79. – № 2. – С. 345-353.
32. Belevitin, V.A. PRESSURE TREATMENT OF METALS MONITORING THE THICKNESS OF SUPERTHIN STEEL BY MEANS OF UD2-12 DEFECTOSCOPES / V.A. Belevitin, A.I. Brazhnikov, E.L. Ivanov, A.K. Tarelkin // Steel in Translation. 2006. – Т. 36. – № 1. – С. 40-42.
33. Belevitin, V.A. CONTRIBUTION OF URAL METAL INDUSTRY TO ECONOMICS OF RUSSIA / V.A. Belevitin // Сталь. 2001. № 9. С. 125-128.
34. Автомобильные эксплуатационные материалы: сб-к лабор. работ / А.Г. Карпенко, К.В. Глемба, В.А. Белевитин. – Челябинск: Изд-во : Челяб. гос. пед. ун-та, 2014. – 104 с.
35. Белевитин, В.А. Материаловедение: неметаллические материалы: учеб. пособие / В.А. Белевитин. – Челябинск: Изд-во Юж.-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2017. – 109 с.
36. Руднев, В.В. Моделирование ресурсов повышения экологической безопасности крупных городов [Текст]: монография / В.В. Руднев, М.Л. Хасанова, В.А. Белевитин. – Челябинск: Изд-во Юж.-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2017. – 88 с.: ил.
37. Технология конструкционных материалов: обработка металлов давлением: учеб пособие / В.А. Белевитин, Е.Н. Смирнов, А.В. Суворов. – Челябинск: Изд-во Челябин. гос. пед. ун-та, 2015. – 184 с.: ил.

38. Gafarova, E.A. Modeling educational process optimization in the development of individual creativity by extending modality skills of the learners / E.A. Gafarova, V.A. Belevitin, Y.N. Smyrnov // *Mechanics and Advanced Technologies*, 2017, № 2 (80). P. 25–30.
39. Белевитин, В.А. Влияние тернарности представления учебной информации на повышение креативности обучающихся / В.А. Белевитин, Е.А. Гафарова, Ю.В. Корчемкина, ОН. Шварцкоп // *European Social Science Journal*. 2017. – № 6. – С. 194–200.
40. К РЕШЕНИЮ ОБЪЕМНОЙ ЗАДАЧИ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА МЕТОДОМ КООРДИНАТНОЙ СЕТКИ / В.К. Воронцов, П.И. Полухин, В.А. Белевитин, В.В. Бринза // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 1976. – № 9. – С. 77–80.
41. MAGNETIC METHOD NONDESTRUCTIVE EXPRESS INSPECTION OF MECHANICAL PROPERTIES / V.A. Belevitin, A.L Mazurovskij, N.I. Brazhnikov, I.P. Belevitina // *Металлург*. 1996. – № 11. – С. 34.
42. Белевитин, В.А. Технология конструкционных материалов: производство горячекатаных блюмов и сортовых заготовок: учеб. пособие / Е.Н. Смирнов, В.А. Белевитин и др. Челябинск: Изд-во ЧГПУ. 2016. – 188 с.
43. Белевитин, В.А. Технология конструкционных материалов: производство горячекатаных блюмов и сортовых заготовок: учеб. пособие / Е.Н. Смирнов, В.А. Белевитин, В.А. Скляр, В.В. Кисиль. Челябинск: Изд-во ЧГПУ. 2016. – 188 с.
44. Патент на изобретение РФ №2558701 Слиток для деформирования / В.А. Белевитин, С.Ю. Коваленко, Е.Н. Смирнов, А.В. Суворов.

45. Патент на полезную модель РФ № 156309 Слиток для деформирования / В.А. Белевитин, С.Ю. Коваленко, Е.Н. Смирнов, А.В. Суворов.
46. Патент на изобретение РФ № 2570564 Способ изготовления модельного образца для определения деформаций / В.А. Белевитин, С.Ю. Коваленко, Е.Н. Смирнов, А.В. Суворов.
47. Патент на полезную модель РФ № 163039 Слиток для деформирования / В.А. Белевитин, С.Ю. Коваленко, Е.Н. Смирнов, А.В. Суворов.
48. Патент на изобретение РФ № 2616671 Способ изготовления модельного образца для определения деформаций / В.А. Белевитин, С.Ю. Коваленко, Е.Н. Смирнов, А.В. Суворов.
49. Минаев, А.А. Исследование полей деформации при прокатке овальных заготовок с неравномерным распределением температуры по сечению / А.А. Минаев, В.А. Белевитин, Е.Н. Смирнов, О.С. Савицкий // Известия вузов. Черная металлургия. – 1992. – №6. – С.20–24.
50. Минаев, А. А. Скорость течения металла при прокатке овальных заготовок с неравномерным распределением температуры по сечению / А.А. Минаев, В.А. Белевитин, Е.Н. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 1993. – № 11-12. – С. 22-25.
51. Минаев, А. А. Демонотонность пластического формоизменения при прокатке овальных заготовок с неравномерным распределением температуры по сечению / А. А. Минаев, Е. Н. Смирнов, В. А. Белевитин // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 1993. – № 6. – С. 34–37.

*Учебное издание*

*Белевитин Владимир Анатольевич*

**СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие

Компьютерная верстка В.А.Белевитин

ISBN 978-5-91283-893-4

Подписано в печать 07.12.2017

Формат 60x841/16

Объем 4,31 уч.-изд. л.

Заказ № 863

Тираж 100 экз.

Издательство ЗАО «ЦИЦЕРО»

454080, г. Челябинск, Свердловский пр-т., 60

Отпечатано с готового оригинал-макета

в типографии ЮУрГППУ

454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69